

关节型机器人的似人操作构型规划

甘亚辉[†], 戴先中, 陆志远

(东南大学自动化学院, 江苏南京 210096; 复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室, 江苏南京 210096)

摘要: 对关节型机器人的操作构型进行规划时, 本文提出了一种新的规划方法, 它结合了似人评估准则和机器人传递特性优化的概念, 可实现有最大末端传递特性的操作, 同时与人类手臂操作的特点最为相似. 该方法首先利用应用人体工程学中的快速上肢评价准则(RULA)对机器人的操作空间进行划分, 然后在各子空间内最大化机器人末端沿指定方向的传递速率. 最终选定一个最符合人类操作特性又同时满足操作任务的机器人操作构型. 通过在2自由度平面机器人和7自由度拟人机械臂上的规划实验进一步展示了本方法的使用, 规划结果验证了其有效性.

关键词: 操作构型规划; 似人程度; 快速上肢评价; 应用人体工程学; 传递速率

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Human-like manipulation planning for articulated manipulator

GAN Ya-hui[†], DAI Xian-zhong, LU Zhi-yuan

(School of Automation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China;

Key Lab of Measurement and Control of Complex Systems of Engineering, Ministry of Education, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: In planning the operation configuration for an articulated manipulator, we propose a novel method which combines the concept of human-like assessment and the velocity transmission ratio. By this method of planning, the manipulator can perform operations most similar to the operations of a human arm, with maximal velocity transmission ratio at its end-effector. The criterion of the rapid upper limb assessment (RULA) which is widely used in applied ergonomics has been adopted to divide the robot operation configuration space into different subregions, in which the velocity transmission ratio of the manipulator along a specified direction is maximized. Then, the final planning result which satisfies the task requirements with the most human-like operations is determined. Illustrative examples of this method applied to a 2 degrees of freedom (DOF) planar robot and a 7-DOF humanoid arm validate its effectiveness.

Key words: manipulation planning; human-like; rapid upper limb assessment; applied ergonomics; velocity transmission ratio

1 引言(Introduction)

传统的机器人操作构型规划问题, 研究者总是以操作构型的规划结果能够满足任务要求为目标, 通常不关心机器人的姿态以及运动的特性是否符合人类的预期或者与人类相似. 区别于这一研究现状, 本文写作的主要目的是提供一种新的针对关节型机器人的操作构型规划方法, 该方法最大的特点是能够保证规划结果具有机器人末端沿指定方向最大的传递速率, 同时操作构型与人类的操作特性最为相似.

关节型机器人的似人操作构型规划问题存在着广泛的应用背景, 比如机器人助手、人工假肢、计算机3D游戏等领域, 都需要机器人的运动特性和操作构型具有较高度的人与相似的特点. 近年来, 随着计算机硬件、传感器技术以及人工智能控制策略的

发展, 机器人的智能化程度和自主决策能力已经得到了较大提高, 越来越多的机器人出现在了与人共存的环境中, 越来越多的机器人参与到与人类的协作过程中. 在人与人相处的社会活动中, 人们总是对于彼此的行为以及动作特点具有强烈的预计和期望, 而超出人们预期的活动则会带来惊讶或者不安. 这一特点在人与机器人协作的过程中更加突出. 在人与机器人相互协作的过程中, 如果机器人的动作与人类平常的运动特点存在较大区别, 就会引起作者的误解或者恐惧. 虽然这只是一心理因素, 但对于机器人助手或者其他服务性的机器人, 即便机器人的某些动作能够完成操作任务, 但在人类看来是十分怪异的行为的话也是不能接受的. 这些应用使得在机器人的操作构型规划过程中, 考虑规划结

收稿日期: 2012-10-12; 收修稿日期: 2013-01-16.

[†]通信作者. E-mail: ganyahui@yeah.net.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61175113); 国家高技术研究发展计划资助项目(2006AA040402, 2007AA041703, 2009AA043903-1-1); 江苏省科技成果转化资助项目(BA2007058); 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CX10B_076Z); 东南大学优秀博士学位论文基金资助项目.

果具有似人特点成为机器人行为控制过程中不得不解决的问题。

2 文献回顾(Literature review)

近几年,围绕关节型机器人的似人操作构型规划问题,国内外都出现了许多研究.在这些研究中,研究者通常尽量模仿人的动作,对于人类手臂的运动特点的研究在机器人控制器的设计中具有重要的指导意义.总的来说,目前有两种方法来解决关节型机器人的似人操作构型规划问题:一种是基于模型的方法,另一种是无模型的方法。

在基于模型的方法中,一般总是存在一个显式的数学模型来描述人的运动特性.迄今为止,人们提出了许多数学模型来描述人类手臂的运动特点.文献[1]提出了一种虚拟疲劳模型,该方法将驱动机器人关节的直流电机绕组温度作为疲劳变量,模拟人的生理疲劳.当有电机开始“疲劳”时,系统就尽量使用那些疲劳程度不高的电机,以此来模仿人类的行为.文献[2]提出一种基于信号相关控制假设的最小方差模型.在该模型中,性能指标定义为过去一段时间内运动的平均位置协方差,机器人通过优化位置协方差来得到最终的构型.文献[3]提出了一种虚拟弹簧-阻尼模型,利用重力环境下的肌肉收缩效应实现机器人运动的自然性,避免了大多数冗余自由度机器人系统中出现的运动重复定位问题和奇异性问题.文献[4]介绍了一种基于带泄漏的积分发放神经元模型的通用反射单元,该反射单元可以适应特殊的反射类型,并且可以被连接而形成依赖性反射行为,文中还介绍了这种神经元模型结构和相应的实验结果.文献[5]提出一种应用于生活环境下的机器人构型调整方法,通过定义一个参考点并将参考点与机器人末端用虚拟弹簧-阻尼连接起来,保证机器人加速度比较缓和、运动比较平滑.文献[6]分析了人抓取柔性物体的动作特性,以加速度变化率最小和驱动力变化最小为目标规划机器人操作构型.文献[7]提出了一种用于描述人类手臂运动特性的数学模型,通过手肘的仰角来表征手臂的运动特点,而肘的仰角又由手的位置和方向来决定,该模型可通过响应面法近似获得.以上所有的研究都采用了传统基于优化概念的规划方法,它们之间的区别仅在于数学模型和性能指标的差异。

在无模型方法中,关节型机器人可以直接模仿人手臂的动作,它们之间的主要区别在于对人手臂运动特点的表述方式的不同.文献[8]介绍了一款似人机器人ARMAR-III实现似人操作特性的实现方法,该系统实现的核心是一个运动模型的数据库,包含机器人工作空间内所有物体的3D模型和机器人抓取器的3D模型.文献[9]建立了一种用于表征机器人手臂自主抓取和操作物体的任务的概率模型,该

方法预先存储了分别从人手视角和物体视角描述的操作任务表述.文献[10]构造了一种结合快速上肢评价准则的受限的机器人操作能力表,该方法可以通过动态查询该表实现机器人的似人操作构型规划.快速上肢评估准则是一种在应用人体工程学中用于评估人手臂姿态的自然和舒适程度的准则.文献[11]通过组合一些基本的运动基元来实现机器人的似人运动,机器人的运动基元通过主成分分析法从两个运动模型数据库中抽象出来:一个是记录了电机控制准则的数据库,另一个是记录以人为对象的动作的数据库.文献[12]采用一种基于进化算法的模仿学习策略实现机器人的似人运动.该方法主要分为两个步骤:第1步对人手臂运动进行模仿学习,模仿学习的过程为似人机器人建立了一个数据库;第2步是利用在学习过程中通过进化演算得到的数据库来实时产生具有似人特性的手臂运动.文献[13]介绍了一种可以模仿人类行为的机器人关节机械,这种机械叫做双活动通用关节,通过两个独立电机间的耦合运动来产生2自由度无滚动的运动。

尽管人们提出了许多解决似人操作构型规划问题的方法,不过这一研究仍然存在许多尚待解决的问题.而且,使用上面提到的方法,并不能保证所有的规划结果一定满足似人的特性要求.对于基于模型的方法,模型总是和现实中的人的行为存在区别.而无模型的规划方法又不能定量的比较哪种规划结果更好.本文尝试将上述两种方法结合起来,提出一种新的机器人似人操作构型规划方法.该方法采用无模型的方法来评估机器人操作构型的似人程度,采用数学优化模型求解得到具有机器人末端沿指定方向传递速率最大的操作构型规划结果。

3 机器人构型的评价指标(Configuration assessment for articulated robot)

3.1 操作度(Manipulability measurement)

操作度被广泛用于定量评估机器人在给定的某个构型下的末端操作能力.下面以 n 自由度关节型机器人为例,介绍操作度的定义.机器人的关节变量用 $\theta_i (i = 1, \dots, n)$ 表示,雅可比矩阵为 $J(\theta)$, $\theta = [\theta_1 \dots \theta_n]^T$.文献[14]给出机器人在构型为 θ 时的操作度的定义

$$\omega = \sqrt{\det J(\theta)J^T(\theta)}. \quad (1)$$

ω 为一标量,反映机器人末端位置和姿态变化的难易程度.从操作度的含义来看,理论上可以计算出机器人的最佳操作构型。

3.2 带有方向性的操作度(Directional manipulability measurement)

如方程(1)定义的操作度是与机器人末端的运动方向无关的.不过,在实际应用中,比如机器人进行

弧焊焊接作业时, 操作任务关注的是焊枪的运动沿焊缝方向变化的难易程度. 因此, 需要提出一种带有方向性的操作度的概念.

文献[15]介绍了传速率的概念, 传速率是表征机器人传速特性的一个指标. 对于机器人的某一姿态, 在任务空间中必然存在某一方向, 使得机器人沿此方向运动需要的关节变化量最小, 那么这个方向就是传速率最大的方向. 传速率大意味着关节运动对机器人末端速度的影响大, 此时机器人末端移动比较灵活, 而传速率小意味着对机器人末端速度的控制较好, 此时机器人末端位姿的移动比较精确.

机器人在任何姿态下的传速特性都可以用一个椭圆描述. 以 n 自由度关节型机器人为例, 关节变量用 $\theta_i (i = 1, \dots, n)$ 表示, 雅可比矩阵为 $J(\theta)$, $\theta = [\theta_1 \dots \theta_n]^T$. 文献[15]给出速度椭圆的定义

$$\dot{\mathbf{x}}^T [J(\theta)J^T(\theta)]^{-1} \dot{\mathbf{x}} \leq 1, \quad (2)$$

其中 $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_m)^T$ 为任务空间方向向量. 图1给出了机器人在某一姿态下的速度椭圆.

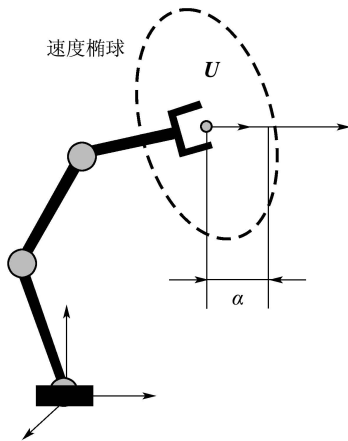


图1 速度椭圆和沿某一方向的传速率

Fig. 1 Velocity ellipsoid and transmission ratio along a vector

如图1所示, 定义椭圆球心沿着方向向量 U 到椭圆表面的距离 α 为沿着方向 U 的传速率, α 的计算结果^[15]为

$$\text{TOVM} = \alpha = \{U^T [J(\theta)J^T(\theta)]^{-1} U\}^{-\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

与传速率类似, 机器人末端的作用力椭圆^[15]定义如下:

$$\mathbf{F}^T [J(\theta)J^T(\theta)] \mathbf{F} \leq 1, \quad (4)$$

其中 $\mathbf{F}$ 是任务空间中的广义作用力向量, 同上可以计算沿着方向 U 的传力速率^[15]为

$$\text{TOFM} = \beta = \{U^T [J(\theta)J^T(\theta)] U\}^{-\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

本文选定方程(3)所示的传速率作为下述最优问题的性能指标. 对于一些作用力要求较高的操作任务, 也可以将机器人末端的传力速率作为优化问题的性能指标.

3.3 快速上肢评价评估准则(Rapid upper limb assessment evaluation criterion)

现实中, 自然人的手臂运动总是显得平滑而优雅. 在机器人领域中, 研究者通常希望模仿人类手臂的动作实现对机器人的运动控制. 应用人体工程学是一门研究人体运动规律、工作能力及其极限的科学, 人体工程学中有关人体手臂的运动规律的研究可用于指导拟人型机器人手、人工假肢等的设计和控制.

本文根据应用人体工程学中的快速上肢评估(rapid upper limb assessment, RULA)准则来衡量机器人构型的似人程度. RULA准则根据不同的姿势对人体肌肉骨骼系统产生的压力来进行评分, 评分的结果越小, 代表这种姿势疲劳程度越小, 舒适程度越高. 由于研究目标为似人操作构型规划, 因此本文假定机器人有着跟人体相似的疲劳机制, 并采用RULA准则对机器人不同的构型进行评分, 以此来判断其似人程度.

本文分为两个步骤来应用RULA准则: 第1步为机器人各个部分的不同构型进行单独评分, 第2步根据第一步的评分结果, 为机器人整体的构型建立一个评分表. 文献[16]详细介绍了RULA准则的一般概念和具体的使用方法. 本文在第3节结合一个平面2自由度机器人进一步说明RULA规则在机器人操作构型规划过程中的使用方法.

4 似人操作构型规划过程(Human-like manipulation planning procedure)

本文提出的针对关节型机器人的似人操作构型规划方法, 将以RULA为准则的机器人构型的似人评估过程与以机器人末端沿指定方向的传速率(TOVM)为目标的优化求解过程相结合. 第1步, 根据RULA准则给机器人各个部分的不同姿态进行评分; 第2步, 根据第1步的评分, 为机器人整体的姿态建立一个评分表; 第3步, 根据评分表将机器人构型空间划分为不同的子空间; 第4步, 以传速率为性能指标, 考虑机器人末端的作用力约束条件, 在机器人各构型子空间进行优化问题的求解. 求解过程从RULA评分分值最小的子空间到评分分值最大的子空间依次进行. 机器人末端的作用力约束条件由完成操作任务所期望的作用力给出. 图2给出了机器人操作构型规划的基本流程.

以 n 自由度的关节型机器人为例, 关节变量用 $\theta_i (i = 1, \dots, n)$ 表示, 雅可比矩阵为 $J(\theta)$, $\theta = [\theta_1 \dots \theta_n]^T$. 假设 O_c 为机器人的构型空间, $O_c \subset \mathbb{R}^n$. 根据文献[16]的方法, 将 O_c 依据RULA得分的不同划分为 K 个子空间, 记为

$$O_c = O_1 \cup O_2 \dots \cup O_K, O_i \cap O_j = \emptyset, \forall i \neq j. \quad (6)$$

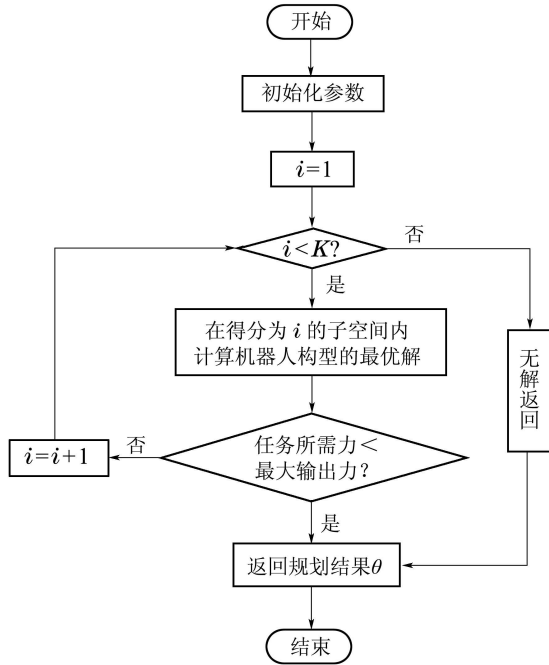


图2 似人操作构型规划过程

Fig. 2 Human-like manipulation planning procedure

本文提出的优化问题的求解模型以机器人末端沿指定方向的传速率(TOVM)为优化目标,以完成操作任务所需的末端作用力为约束条件,记 $\tau_{\max}$ 为机器人的最大关节扭矩, F_d 为完成操作任务所期望的机器人末端输出力.优化问题的求解模型可记为

$$J(\theta^*) = \min_{\theta} - \{U^T [J(\theta) J^T(\theta)]^{-1} U\}^{-\frac{1}{2}},$$

$$\text{s.t. } F_d \leq F_{\max}(\theta^*),$$

$$F_{\max}(\theta^*) = (J^T(\theta^*))^+ \tau_{\max},$$

$$\text{RULA}(\theta^*) \leq \text{RULA}(\theta), \forall \theta \in O_c. \quad (7)$$

求解优化过程得到的 θ^* 即是本方法的规划结果.

5 平面2自由度机器人构型规划(Configuration planning for 2DOF planar robot)

以一平面2自由度机器人为例,进一步介绍本方法的规划过程.图3给出了平面2自由度机器人的示意图,关节变量的定义如图所示,其中: $\theta_1 \in [-180^\circ, 180^\circ]$, $\theta_2 \in [0^\circ, 180^\circ]$.

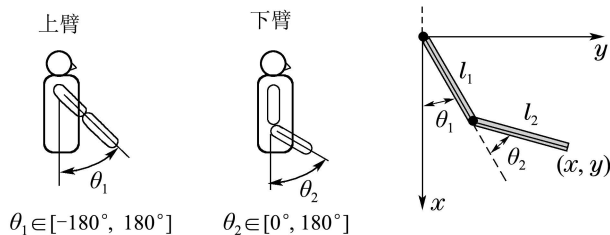


图3 平面2自由度机器人示意图

Fig. 3 Schematic model of a 2 DOF planar robot

根据RULA准则对机器人各关节构型的似人程度进行评价,评分结果如图4所示.

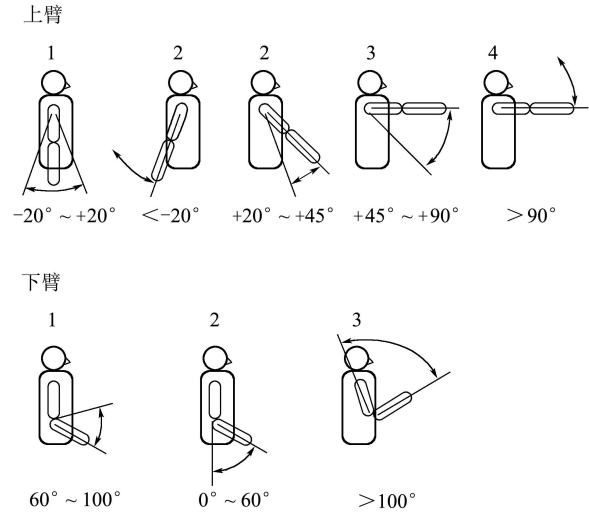


图4 2 DOF机器人关节构型评分: 上臂、下臂
Fig. 4 The posture scores for individual part of a 2 DOF robot: the upper arm and the lower arm

图4中机器人各关节的得分结果继承了文献[16]的研究结论.根据图4中机器人各个关节的RULA评分结果,构造机器人总体构型似人程度的评分表,评分结果如表1所示.该表的评分结果同样继承了文献[16]的研究结论.

表1 机器人构型评分表
Table 1 Posture score table

上臂	下臂	评分
1	1	1
	2	2
2	1	2
	2	3
3	1	3
	2	3
4	1	4
	2	4

根据上述构型评分表1,机器人的构型空间可以划分为Score = 1, 2, 3, 4的子空间.根据表1得到的机器人构型空间的划分结果如图5所示.

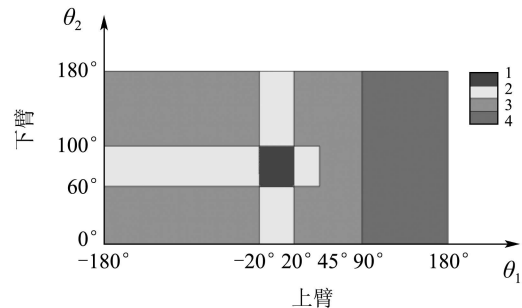


图5 机器人构型空间与划分结果

Fig. 5 Configuration space and the division result

考虑如下机器人操作构型的规划问题: 该机器人执行弧焊焊接作业任务,要求机器人末端沿着焊

接方向 $\mathbf{U}$ 灵活移动完成焊接, $\mathbf{U} = (\sin \alpha, \cos \alpha)^T$, $\alpha \in [0^\circ, 360^\circ]$. 规划结果 $\Theta^* = (\theta_1^*, \theta_2^*)^T$ 可通过下述优化问题的求解得出

$$\begin{aligned} & -\text{TOVM}(\Theta^*) = \\ & \min_{\Theta} \{ -\{\mathbf{U}^T [J(\Theta) J^T(\Theta)]^{-1} \mathbf{U}\}^{-\frac{1}{2}} \}, \\ & \text{s.t. } \text{RULA}(\Theta^*) \leq \text{RULA}(\Theta), \forall \Theta \in \mathbf{O}_c. \end{aligned} \quad (8)$$

如图3所示的平面2自由度机器人的运动学正解方程为

$$\begin{cases} x = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2), \\ y = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2), \end{cases} \quad (9)$$

其中: 机器人上臂和下臂的长度分别为 $l_1 = 1 \text{ m}$, $l_2 = 1 \text{ m}$, 机器人的雅可比矩阵为

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix}. \quad (10)$$

焊接方向 $\mathbf{U} = (\sqrt{2}/2, \sqrt{2}/2)^T$.

根据如图2所示的规划流程进行计算, 并求解式(8)对应的 Θ^* , 可得机器人操作构型规划结果

$$\Theta^* = (20^\circ, 100^\circ)^T.$$

为对比本文提出的规划方法的结果与其他机器人操作构型规划方法在似人程度和机器人末端传速特性上的区别, 采用文献[15]中介绍的方法重新对该问题进行规划计算, 得到的规划结果为

$$\Theta^* = (135^\circ, 0^\circ)^T.$$

图6显示了两种不同规划结果所对应的机器人构型. 从图中可以看出采用本文提出的方法得到的规划结果比文献[15]中介绍的方法的规划结果更符合人类的操作习惯, 具有更高的与人相似的特性.

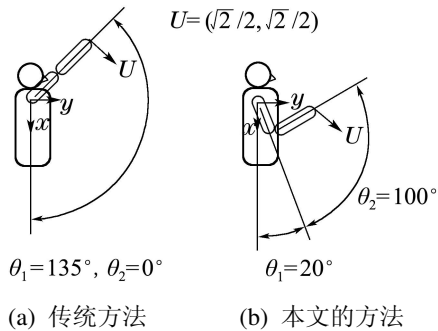


图6 规划结果的机器人构型

Fig. 6 Robot configuration at planned results

图7和图8显示了上述两种规划结果对应的机器人末端沿指定方向 $\mathbf{U}$ 的传速速率. 图7给出了函数

$-\text{TOVM}(\Theta)$ 在整个构型空间的分布图, 图中标注的点对应规划结果 $\Theta = (135^\circ, 0^\circ)^T$, 它是机器人在整个构型空间中末端沿指定方向 $\mathbf{U}$ 传速速率最大的点. 图8给出了函数 $-\text{TOVM}(\Theta)$ 在RULA准则得分为1的子空间内的分布图, 图中标注的点对应规划结果 $\Theta = (20^\circ, 100^\circ)^T$, 它是机器人在RULA得分为1的子空间中传速速率最大的点. 图8表明了采用本文提出的方法得到的规划结果在RULA准则下, 与人类手臂动作最为相似同时具有末端沿指定方向的传速速率局部最大的特点.

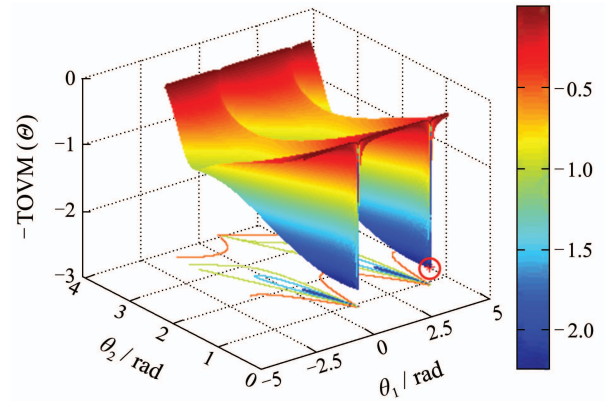


图7 $-\text{TOVM}(\Theta)$ 在整个机器人构型空间的函数图

Fig. 7 Function graph of $-\text{TOVM}(\Theta)$ in configuration space

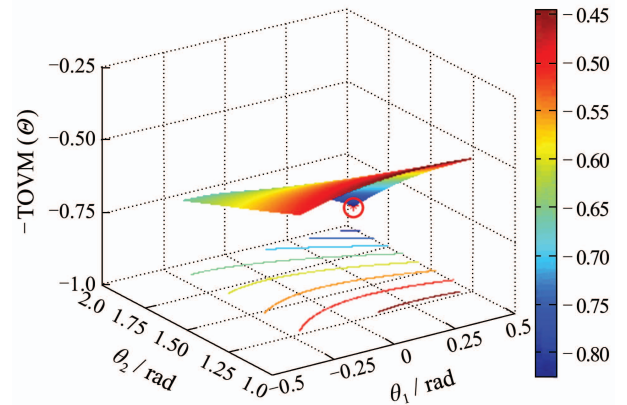


图8 $-\text{TOVM}(\Theta)$ 在机器人得分为1的构型子空间函数图

Fig. 8 Function graph of $-\text{TOVM}(\Theta)$ in subregion of configuration space with score = 1

为进一步验证本文提出的关节型机器人的似人操作构型规划方法的有效性, 针对不同的机器人末端运动方向 $\mathbf{U}$ 完成构型规划实验. 实验结果如表2所示, 其中 Θ_1 是采用文献[15]介绍的方法得到的规划结果, $\text{TOVM}(\Theta_1)$ 是机器人对应 Θ_1 构型的末端传速速率, Θ_2 是采用本文提出的方法得到的规划结果, $\text{TOVM}(\Theta_2)$ 是机器人对应 Θ_2 构型的末端传速速率.

上述机器人操作构型的规划没有考虑机器人末端作用力的要求, 但对于搬运、打磨一类的作业任务, 在规划机器人的操作构型时必须考虑作用力的约束条件. 考虑如下机器人操作构型规划问

题: 该平面2DOF机器人要沿着指定方向 $\boldsymbol{U}$ 将工件从位置 A 搬到位置 B , $\boldsymbol{U} = (\sqrt{2}/2, \sqrt{2}/2)^T$. 在搬运过程中, 机器人末端的输出力不能小于 $\boldsymbol{F}_d$, $\boldsymbol{F}_d = (1, 0)^T$ N. 执行如图2所示构型规划流程, 并根据式(7)求解优化问题. 表3给出了针对不同大小的机器人末端作用力要求 $\boldsymbol{F}_d$ 下的构型规划结果. 通过对比不同大小的 $\boldsymbol{F}_d$ 对应的规划结果 Θ^* 可以看出, 当机器人末端的作用力要求 $\boldsymbol{F}_d$ 增大时, 为保证操作任务的完成, 规划结果的似人程度可能会降低(得分增大), 甚至可能出现一些不符合人们预期的操作构型.

表 2 沿不同方向的机器人操作构型规划结果

Table 2 Planing results along different direction

$\boldsymbol{U}^T$	θ_1^T	TOVM(θ_1)	θ_2^T	TOVM(θ_2)
$(\frac{\sqrt{2}}{2}, \frac{\sqrt{2}}{2})$	(135, 0)	2.2363	(20, 100)	0.8251
(0, 1)	(180, 0)	2.2363	(-20, 60)	1.2203
(0.6, 0.8)	(143.13, 0)	2.2363	(20, 100)	0.7626
(1, 0)	(90, 0)	2.2363	(20, 96.28)	1.4935
(0.6, -0.8)	(36.87, 0)	2.2363	(-0.08, 60)	1.9501

表 3 不同大小的作用力要求对应的规划结果

Table 3 Planing results for different desired force

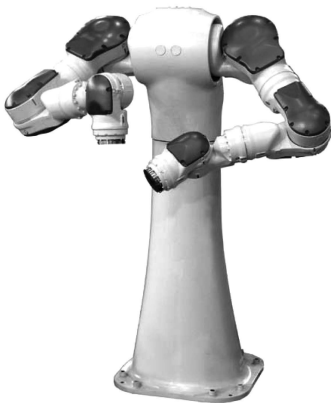
$(\boldsymbol{F}_d)^T$	$(\Theta^*)^T$	TOVM(Θ^*)	$\boldsymbol{F}^T(\Theta^*)$	得分
(0, 0)	(20, 100)	0.83	(1.46, -0.53)	1
(2, 0)	(-20, 89.31)	0.6189	(2.00, 2.46)	1
(0, 2)	(20, 100)	0.8251	(-0.57, 2.99)	1
(4, 0)	(-20, 56.73)	0.4848	(4.00, 1.74)	2
(0, 4)	(20, 53.61)	0.4049	(2.22, 4.00)	2

综合表2和表3中的规划结果, 以及图6所显示的机器人操作构型, 初步验证了本文所提出的针对关节型机器人的似人操作构型规划方法的正确性和有效性.

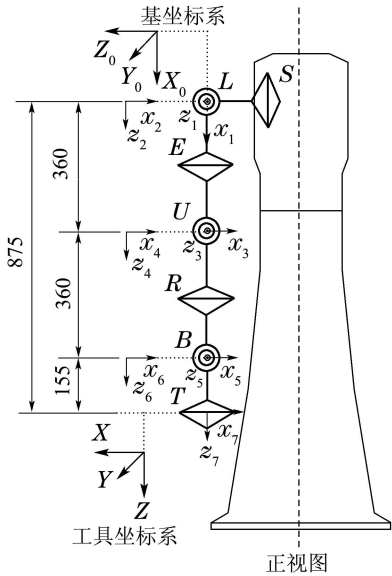
6 7自由度拟人机械臂构型规划(Configuration plan for 7DOF humanoid arm)

为进一步验证本文提出的机器人似人操作构型规划方法的有效性, 针对7自由度拟人机械臂进行操作构型规划实验. 实验的对象是日本安川电机株式会社生产的拟人型机器人Motoman SDA10D. SDA10D机器人是一款多用途、高灵活性的人形机器人, 该机器人具有两个7自由度的拟人型手臂和1个可回转的腰部, 共15个旋转自由度. SDA10D机器人具有苗条的流线型结构, 单臂10kg有效负荷, 能够完成装配、零部件搬运、机械弯曲、包装以及其他一些通常需要人来完成的工作. Motoman SDA10D机器人的照片以及右臂的运动学模型如图9所示. 按照Denavit-Hartenberg方法对机器人的

右臂进行运动学建模, 得到机器人右臂的Denavit-Hartenberg(DH)参数如表4所示.



(a) Motoman SDA10D 机器人



(b) SDA10D 机器人右臂运动学模型

图 9 SDA10D机器人和右臂的运动学模型
Fig. 9 Photograph of SDA10D robot and the kinematic model of its right arm

表 4 SDA10D机器人的右臂的DH参数

Table 4 Denavit-Hartenberg parameters for right arm of SDA10D robot.

轴	θ_i	α_i	a_i/mm	d_i/mm	范围
S	θ_1	-90°	0	0	$-180^\circ \sim 180^\circ$
L	θ_2	90°	0	0	$-110^\circ \sim 110^\circ$
E	θ_3	-90°	0	360	$-170^\circ \sim 170^\circ$
U	θ_4	90°	0	0	$-135^\circ \sim 135^\circ$
R	θ_5	-90°	0	360	$-180^\circ \sim 180^\circ$
B	θ_6	90°	0	0	$-110^\circ \sim 110^\circ$
T	θ_7	0°	0	155	$-180^\circ \sim 180^\circ$

针对 Motoman SDA10D 机器人的右臂进行操作构型的规划实验. 首先对机器人手臂的各部分按

照RULA准则进行评分, 评分结果如下图10所示. RULA主要针对人类的手臂各部分给予相应评价, 包括大臂、小臂以及手腕. 由于SDA10D机器人是一款拟人型机器人, 其右臂与人类手臂在结构上具有相似性, 因此在本实验中对SDA10D机器人的右臂各组成部分采用了与参考文献[16]相同的评分结果. 进而针对SDA10D机器人的右臂构造类似表1的构型评分表. 机器人构型评分表得出依赖机器人各部分的构型评分结果, 本实验中采用了与文献[16]相同的评分结果, 因而构型评分表也与文献[16]中的相同. 因此本文不再列出该表, 机器人构型评分表的具体形式请参见文献[16].

记 $\mathbf{U} = (x, y, z, \varphi, \theta, \phi)^T$ 是机器人手臂的期望运动方向, 其中 $(x, y, z)^T$ 是平移运动的单位向量在机器人基坐标系下的表示, $(\varphi, \theta, \phi)^T$ 是Roll-Pitch-Yaw(RPY)形式的机器人末端旋转运动的单位向量在机器人基坐标系下的表示. 考虑到机器人在执行给定任务时, 通常关注的是末端运动的平移特性, 因而在机器人构型的规划实验中采用 $\mathbf{U} = (x, y, z)^T$ 的简化形式表示机器人手臂的期望运动方向. 在给定 $\mathbf{U}$ 的情况下, 执行上述构型规划过程, 得到SDA10D机器人右臂的操作构型为 $\Theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7)^T$, 其中 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7$ 分别表示该臂上 S, L, E, U, R, B, T 轴的关节角度. 表3是SDA10D机器人的右臂在不同的作用力约束下, 沿不同方向的似人操作构型的规划结果.

为进一步评价表5中列出的机器人操作构型规划结果的正确性, 图11给出了SDA10D机器人的右臂在一些规划结果处对应的操作构型. 从图11中给出的几组结果可看出, SDA10D机器人的右臂的操作构型是相当合理的. 因此, 本文提出的针对关节型机器人的似人操作构型规划方法是十分有效和可行

的.

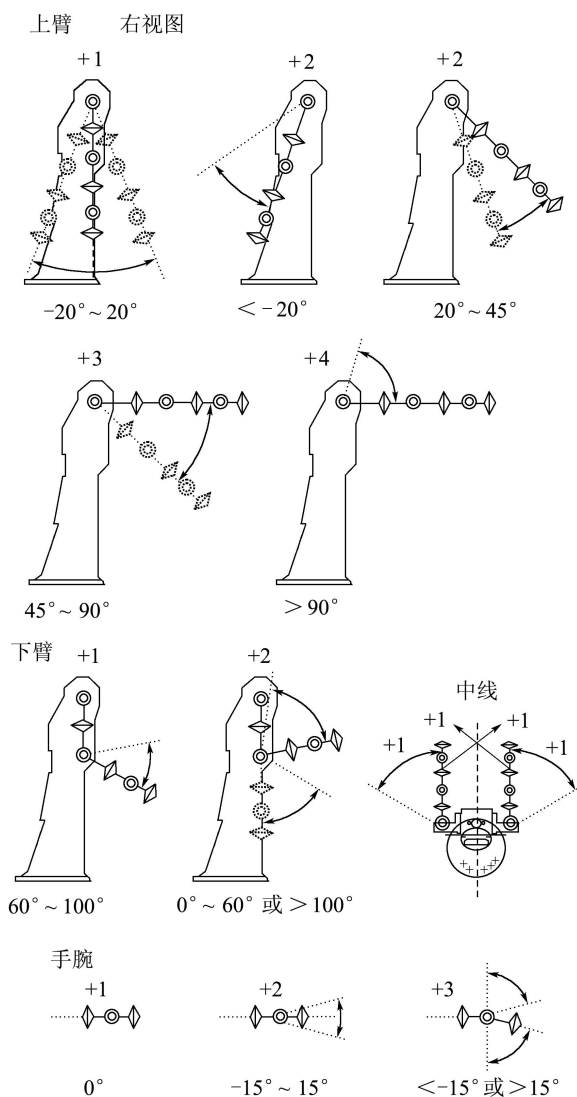


图10 SDA10D机器人的右臂各部分构型评分

Fig. 10 Posture scores for individual part of the right arm of SDA10D: the upper arm, lower arm and wrist

表5 SDA10D机器人的右臂沿不同运动方向的似人操作构型的规划结果

Table 5 Planing results along different motion directions for right arm of SDA10D robot

$\mathbf{U}^T$	$(\mathbf{F}_d)^T$	$(\mathbf{F}_{\max}(\Theta))^T$	Θ^T	TOVM(Θ)	得分
(1, 0, 0)	(0, 0, 0)	(79.23, 4.01, -77.36)	(-16.03, 90, 90, 100, -90, 0, 0)	0.7750	1
(1, 0, 0)	(100, 0, 0)	(100, 222.14, -78.69)	(20, 90, 90, 89.26, -90, 0, 0)	0.4522	1
(1, 0, 0)	(300, 0, 0)	(300, 177.16, -90.88)	(-20, 90, 90, 66.50, -90, 60, 0)	0.2429	2
(1, 0, 0)	(0, 400, 0)	(302.17, 400, -52.39)	(20, 90, 90, 43.14, -90, 15, 0)	0.2104	2
(1, 0, 0)	(400, 0, 0)	(400, -9.93, 330.32)	(45, 90, 90, 148.49, -90, 60, 0)	0.2254	3
(0.6, 0.64, 0.48)	(0, 0, 0)	(84.48, 5.92, 33.48)	(20, 90, 90, 100, -90, 0, 0)	0.3992	1
(0.6, 0.64, 0.48)	(100, 0, 0)	(100, 222.14, -78.69)	(-16.03, 90, 90, 100, -90, 0, 0)	0.2867	1
(0.6, 0.64, 0.48)	(200, 0, 0)	(200, 183.79, -75.05)	(-20, 90, 90, 78.86, -90, 0, 0)	0.2496	1
(0.6, 0.64, 0.48)	(400, 0, 0)	(400, 143.31, -43.05)	(-20, 90, 90, 51.66, -90, 15, 0)	0.2150	2
(0.6, 0.64, 0.48)	(0, 400, 0)	(-333.26, 400, 30.88)	(20, 0, 119.73, 95.07, -90, 0, 0)	0.7617	2

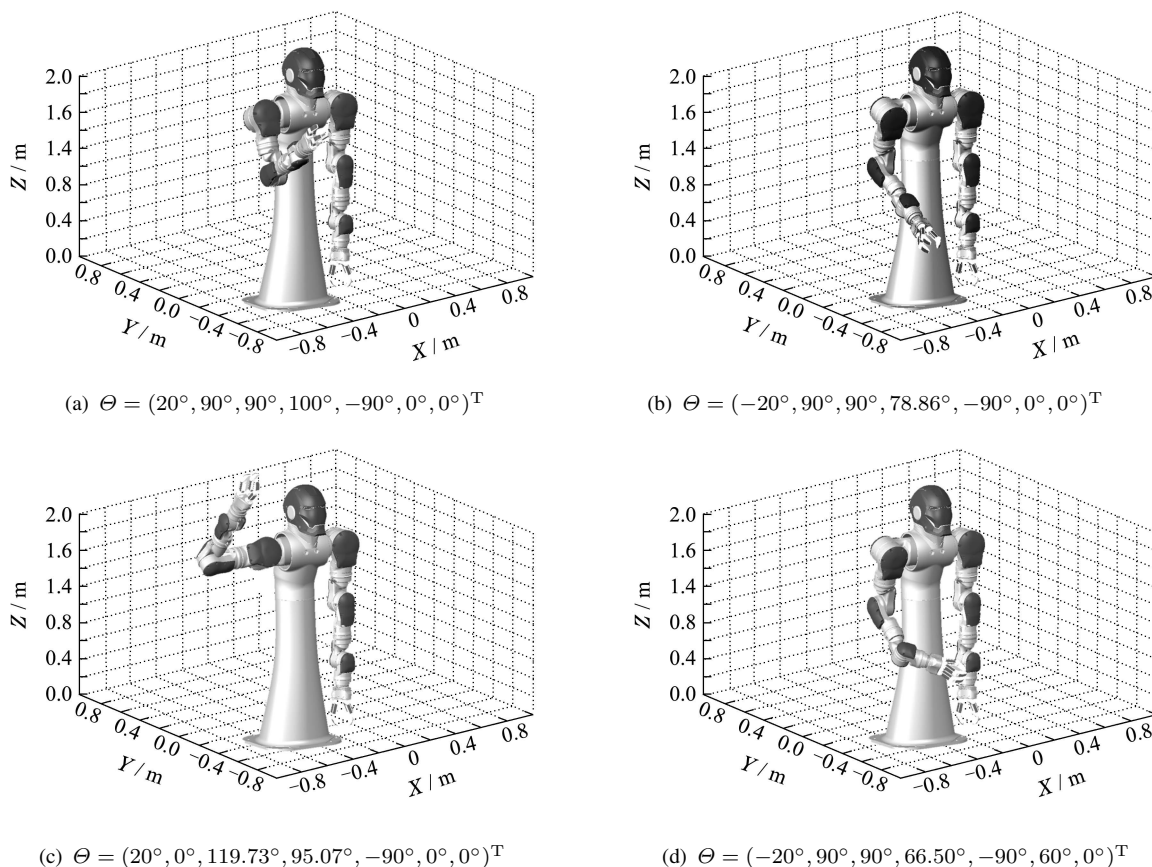


图 11 规划结果对应的SDA10D机器人右臂的构型

Fig. 11 Right arm configuration of SDA10D at planned results

7 进一步的工作(Future works)

关节型机器人的似人操作构型规划问题是一项近来越来越引起机器人相关领域研究者重视的问题. 虽然采用本文提出的方法能够初步解决这一问题, 但本方法依然存在以下几方面需要进一步完善:

1) 优化算法.

本文在优化问题的求解过程采用了顺序二次型规划(sequential quadratic programming, SQP)算法, 但SQP算法在面对机器人自由度增加时的求解能力会显得不足. 而且, 由于规划问题是在高维空间(拟人手臂机器人的自由度通常 ≥ 7)中搜索, 计算结果有可能会陷入局部极小值点, 导致规划问题失败. 因而寻找一种具有更高求解能力的优化算法对本文提出的方法是十分必要的. 在今后的研究中, 拟采用智能启发式搜索算法完成优化问题的求解, 如遗传算法、模拟退火算法、类电磁机制算法等.

2) 似人评估准则.

本文使用快速上肢评价准则(RULA)作为衡量机器人构型与人相似程度的标准, 对于拟人型机

器人、服务机器人等大多数垂直关节型的机器人, 这一评价机制是比较合理的. 但是, 当机器人的结构和外观与人类手臂存在较大区别时, 比如直角坐标机器人、SCARA型机器人, 继续使用RULA准则就不合适了. 因为很难说明机器人的哪种构型更加与人相似, 也就不能直接套用RULA规则作出评价. 尽管机器人的构型与人类不再相似, 但总是存在某型构型更加符合人们的期望(human expectation). 因此, 为扩大本方法的适用范围, 针对不同类型的机器人提出相应的似人评估准则是必要的, 也是可行的.

3) 性能指标.

本方法在规划机器人的操作构型时, 仅考虑了机器人末端沿指定方向的传递速率TOVM、机器人构型的似人程度RULA以及操作任务期望的作用力大小 F_d . 但是在现实世界中, 人们在规划自己的手臂动作时还会考虑更多的因素, 比如躲避操作空间中的障碍物、操作过程最省力、保持操作对象在自己的视野范围、与同一任务中的协作保持一定相对位置关系等等. 为改进本文提出的方法, 在今后的工作中会进一步在规划过程中考

虑上述因素, 以优化目标或者约束条件的形式将上述因素融入规划问题的求解模型中。

8 结论(Conclusions)

本文针对关节型机器人的似人操作构型规划问题, 提出了一种结合机器人构型似人评价和机器人传速特性优化思想的新方法。在本方法中采用的机器人构型似人评价准则——RULA准则, 是一种基于统计结果的评价准则, 同时具体的构型规划结果又依靠机器人末端沿指定方向的传速速率最大的优化求解得出。因此, 本文提出的方法可以看作是对现有的无模型规划方法与基于模型的规划方法的结合。希望本方法的使用能够进一步提高拟人机器人的自主规划能力和智能化程度, 为促进机器人与人类共存与协作提供帮助。

参考文献(References):

- [1] POTKONJAK V, TZAFESTAS S, KOSTIC D, et al. Human-like behavior of robot arms: general considerations and the handwriting task—Part I: mathematical description of human-like motion: distributed positioning and virtual fatigue [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2001, 17(4): 305 – 315.
- [2] SVININ M, YAMAMOTO M. A mathematical analysis of the minimum variance model of human-like reaching movements [C] // *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. San Francisco, CA, USA: IEEE, 2011: 4386 – 4391.
- [3] BAE J H, YANG W, KIM D, et al. Robotic arm control inspired by human muscle tension effect under the gravity [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Shanghai: IEEE, 2011: 1404 – 1411.
- [4] BAUER C, MILIGHETTI G, YAN W, et al. Human-like reflexes for robotic manipulation using leaky integrate-and-fire neurons [C] // *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Taiwan: IEEE, 2010: 2572 – 2577.
- [5] SETO F, SUGIHARA T. Online nonlinear reference shaping with end-point position feedback for human-like smooth reaching motion [C] // *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Humanoid Robots*. Paris: IEEE, 2009: 297 – 302.
- [6] SVININ M, GONCHARENKO I, LUO Z W, et al. Modeling of human-like reaching movements in the manipulation of flexible objects [C] // *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Beijing: IEEE, 2006: 549 – 555.
- [7] KIM S, KIM C H, PARK J H, et al. Human-like arm motion generation for humanoid robots using motion capture database [C] // *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Beijing: IEEE, 2006: 3486 – 3491.
- [8] ASFOUR T, AZAD P, VAHRENKAMP N, et al. Toward humanoid manipulation in human-centered environments [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2008, 56(1): 54 – 65.
- [9] FARIA D R, MARTINS R, LOBO J, et al. Extracting data from human manipulation of objects towards improving autonomous robotic grasping [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2012, 60(3): 396 – 410.
- [10] ZACHARIAS F, SCHLETTE C, SCHMIDT F, et al. Making planned paths look more human-like in humanoid robot manipulation planning [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Shanghai: IEEE, 2011: 1192 – 1198.
- [11] TUAN T M, SOUERES P, TAIX M, et al. Humanoid human-like reaching control based on movement primitives [C] // *Proceedings of IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*. Viareggio, Italy: IEEE, 2010: 546 – 551.
- [12] PARK G R, KIM K G, KIM C H, et al. Human-like catching motion of humanoid using evolutionary algorithm(EA)-based imitation learning [C] // *Proceedings of IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*. Toyama, Japan: IEEE, 2009: 809 – 815.
- [13] SUNGMOO R, HYOUKRYEOL C. Double active universal joint (DAUJ): robotic joint mechanism for human-like motions [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2001, 17(3): 290 – 300.
- [14] YOSHIKAWA T. Manipulability of robotic mechanisms [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 1985, 4(2): 3 – 9.
- [15] CHIU S L. Task compatibility of manipulator postures [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 1988, 7(5): 13 – 21.
- [16] MCATAMNEY L, CORLETT E N. RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders [J]. *Applied Ergonomics*, 1993, 24(2): 91 – 99.

作者简介:

甘亚辉 (1985–), 男, 博士研究生, 研究领域为智能化焊接机器人应用、多机器人协作、无夹具焊接过程控制, E-mail: ganyahui@yeah.net;

戴先中 (1954–), 男, 教授, 博士生导师, 研究领域为机器人控制、电力系统控制、软测量及信号处理, E-mail: xzdai@seu.edu.cn;

陆志远 (1988–), 男, 硕士研究生, 研究领域为机器人操作构型规划、多机器人协作, E-mail: arcelan.sara@gmail.com.