

立式洗浴护理机器人的运动控制^①

尚振东^{②*} 张晓兰^{**} 胡志刚^{**}

(^{*}河南科技大学 机电工程学院 洛阳 471003)

(^{**}河南科技大学 医学技术与工程学院 洛阳 471003)

摘要 为满足护理机器人的宜人化要求,研究了一种洗浴护理机器人的运动控制,提出了一种基于人体尺寸信息和运动状态信息的护理机器人运动控制方法。运用这种控制方法的洗浴机器人采用立式活动座椅结构,包括辅助起立装置、搓洗装置、水循环装置和挡板等,以满足洗浴者坐姿和立姿下进行淋浴;仿照正常人体自然起立过程规划人体辅助起立重心轨迹,根据重心轨迹的拟合方程定义偏差函数并构建插补运动控制器,使其适应不同身高的人体起立;采用基于专家系统的递阶控制策略,使搓洗装置可对洗浴者的背部、臀部和腿部进行个性化搓洗。专家系统的推理机根据数据库中洗浴者人体参数信息、历史知识和实测数据,对搓澡强度进行推理决策。建立了实验样机并进行了试验,试验结果验证了设计方法的可行性。

关键词 服务机器人, 护理机器人, 洗浴, 智能控制, 专家系统

0 引言

服务机器人已被广泛应用于照顾残疾人及老弱病人^[1]。护理机器人(nursing-care assistant robot)是协助护理人员护理行动不便的老人或病人的服务机器人。与其他机器人不同,护理机器人的护理对象是具有情感的人,因此,其外观内饰、运动轨迹、控制模式等都应该更加符合人们的生理和心理^[1],即更加宜人化。为了适应护理机器人的宜人化要求,在设计护理机器人控制系统时,应充分利用人体信息。人体信息包括身体参数信息和运动状态信息等。不同的人有不同的身高、体重、胸围、臂长、视野、听阈等身体参数信息。在设计上,护理机器人应尽量选择绝大多数老弱病人都适用的尺寸。除此之外,人在做某一动作时也具有一定的运动速度、幅度及关节夹角等运动状态信息,在护理机器人护理操作中,

只有使得护理对象各部分运动速度和各个关节都处于合适的调节范围内时,人才感到舒适^[1,2]。本研究根据护理机器人的宜人化要求,以洗浴护理机器人为例研究了护理机器人的运动控制,根据洗浴护理机器人的立式活动座椅式结构,提出了符合人的起立习惯的插补运动控制方法以实现辅助起立,构建了基于人体参数的专家系统控制策略以实现对洗浴者的个性化自动搓洗。

1 立式洗浴护理机器人总体方案与机械结构

护理老弱病残者洗浴的主要困难在于入出浴、搓澡和挪动身体等操作^[3-5]。其中入出浴的困难主要是由于洗浴者在轮椅等转移器械上的重心位置与传统洗浴器械的落差大,导致将老年人移入移出洗浴器械时需要耗费很大的护理人力。如果能保证洗浴者在洗浴器械中和轮椅中重心高度基本一致,将

^① 863 计划(2008AA040208)和国家国际科技合作(2011DFA10440)资助项目。

^② 男,1968 年生,硕士,副教授;研究方向:服务机器人技术,智能控制理论及应用等;联系人,E-mail: cnlyszd@163.com
(收稿日期:2015-01-15)

极大地减轻护理人力。另一方面,对于老年人洗浴,身体前半部分可以自主搓洗,而背部、臀部和腿部搓洗困难。为解决这些问题,本研究提出了一种立式洗浴护理机器人方案,如图 1 所示。

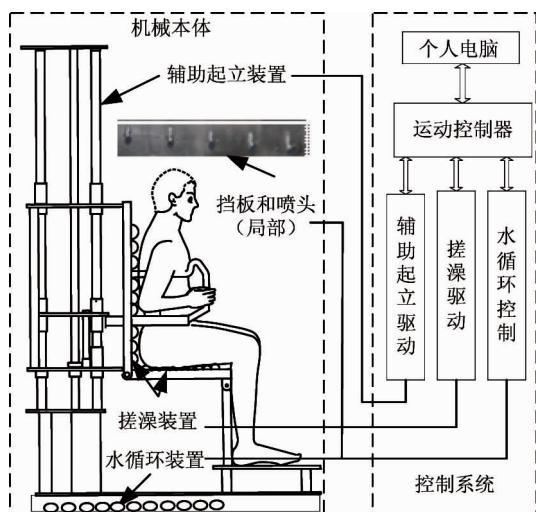


图 1 立式洗浴护理机器人总体方案

立式洗浴护理机器人的工作流程是:护理人员通过轮椅等将老年人推移到洗浴护理机器人旁,并将其搀扶或抱到洗浴护理机器人座椅上坐下,然后由洗浴者或护理者通过控制键盘的操作进行辅助洗浴;机器人可根据需要实现坐姿和立姿的自动转换,坐姿时可自动搓洗背部和腿部,站姿时背部、臀部和腿部都可自动搓洗。洗浴结束后,再由护理人员将洗浴者搀扶或抱出洗浴护理机器人。

立式洗浴护理机器人包括控制系统和机械本体。控制系统以个人电脑(personal computer, PC)和运动控制器为控制核心。PC 实现搓澡运动决策和插补运动控制,向运动控制器发送运动指令。运动控制器将运动指令转换成脉冲量控制信号给驱动器驱动各个执行器协调运动,带动机械本体完成相应功能。机械本体包括辅助起立装置、搓洗装置、水循环装置和挡板等部分组成。

辅助起立装置机构运动简图如图 2(a)所示(图示为坐姿),丝杠 6 在伺服电机带动下旋转,通过丝杠螺母副带动脚踏板 2 相对机架 1 水平运动;丝杠 7 在伺服电机带动下旋转,通过丝杠螺母副带动靠背提升架 5 相对机架 1 垂直运动。起立过程中洗浴

者坐在座椅支架 4 上,并通过固定在 5 上的扶手支撑腋窝。

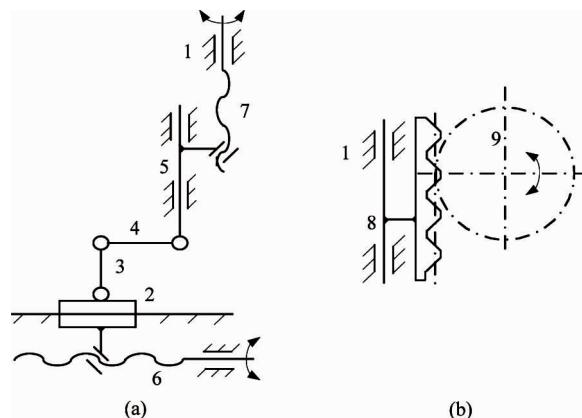


图 2 装置的机构运动简图

为适应不同身材的洗浴者,图 2(a)中件 3 采用电动推杆,以调节座椅支架 4 的高度。扶手具有防前倾凸起(见图 1),两侧扶手间距可调。在活动脚踏板 2 下安装称重传感器,检测辅助起立过程中洗浴者对活动脚踏板 2 的压力,输入减重控制系统进行减重控制。

搓洗装置包括背部搓洗机构、臀部搓洗机构和腿部搓洗机构。背部搓洗机构运动简图如图 2(b)所示,伺服电机通过减速器由齿轮 9 带动齿条 8 相对机架 1 往复运动,与齿条 8 固定的搓头(见图 1)摩擦皮肤,去除污垢。搓头固定架选用弹性板材制成,采取弧形结构,以便在一定压力下,能更好地贴合人体。搓头固定架相应位置上粘贴金属应变片,可实时测试洗浴者对固定架的压力,输入搓洗强度专家系统。

2 辅助起立装置的差补运动控制

2.1 辅助起立重心轨迹规划

人体自然起立过程主要是依靠下肢力量使人体重心由坐姿静止到立姿动态平衡的连续过程^[2]。如图 3 所示,若以地面为参照,在站立过程中,人体踝关节位置不变,重心向前上方移动。有关学者将正常人从坐姿到站立的过程分为三个阶段^[2,6]:向前过渡阶段、向上过渡阶段和站立稳定阶段,如图 3 所示。

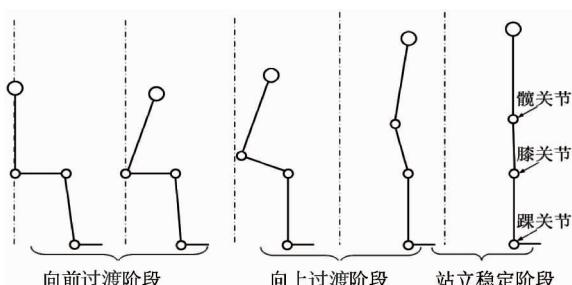


图 3 人体自然起立运动过程示意图

为满足辅助起立机器人占用空间小、容易实现等要求,采用向后辅助起立的设计思路^[7]。向后辅助起立过程如图 4(a)所示,由于存在机器人的辅助,向后辅助起立无需向前过渡阶段和站立稳定阶段,只要使机器人辅助人体实现向上过渡阶段即可。图 4(b)中坐标系为:在正中矢状面(median sagittal plane)上通过人体重心的竖直直线作为纵轴(y 轴,向上为正),纵轴与地面的交点作为原点,正中矢状面与地面的交线作为横轴(x 轴,指向人体前方为正)。将身高 1798mm 体重 85kg 的人体自然起立重心轨迹中向上过渡阶段绕其对称轴翻转 180°,得到

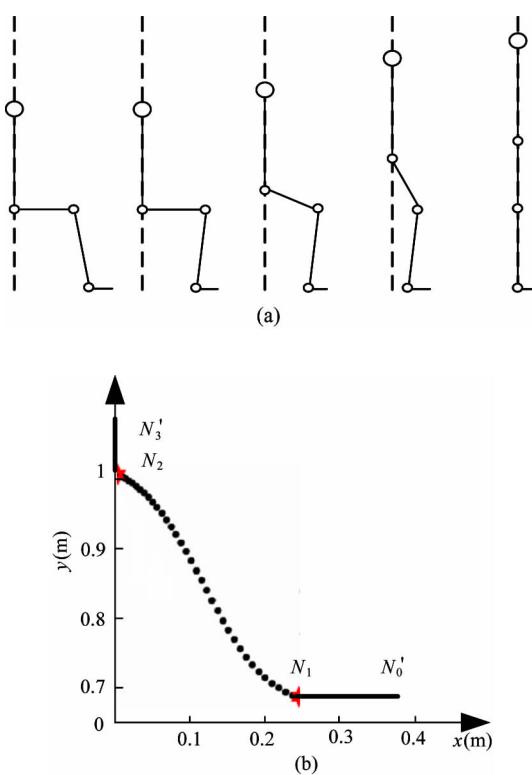


图 4 向后起立过程及重心轨迹规划

图 4(b)中 $N_1 - N_2$ 段曲线,考虑到不同人的不同重心高度和不同的腿长,增加一段水平运动(从 N_0' - N_1)和竖直运动($N_2 - N_3'$)。图 4(b)所示为规划的辅助人体起立的重心轨迹。

向后起立过程若以地面为参照,人体重心向后上方移动;若以踝关节位置为参照,则人体重心相对仍是向前上方移动,因此这种向后辅助起立的运动方式与人体自然起立时的重心运动趋势是一致的。对照图 3 和图 4(a),两种起立过程向上过渡阶段中的典型状态下,人体各个部位的姿态、各个关节的夹角等都是基本一致的。因此,这种向后辅助起立的运动方式在一定程度上是符合人体自然起立运动习惯的。

2.2 插补运动控制

当辅助起立开始时,纵向(y 轴)电机停止,横向(x 轴)电机驱动脚踏板运动,带动洗浴者的脚向后移动,当 x 到位置 N_1 点时,进入插补运动控制。

根据图 4(b)中 $N_1 - N_2$ 段曲线上点的坐标,拟合出二次曲线方程为

$$y = 3.606x^2 - 2.255x + 0.9995 \quad (1)$$

其中:误差平方和(squares sum of error, SSE)为 0.002978,判定系数(coefficient of determination, COD)为 0.9918,均方根误差(root mean square error, RMSE)为 0.009802。

如图 4(b)所示的人体重心辅助起立轨迹起点 $N_1(x_1, y_1)$,终点 $N_2(x_2, y_2)$,对于其上任一轨迹点 $P(x_i, y_i)$,定义偏差函数为

$$f_i = y_i - 3.606x_i^2 + 2.255x_i - 0.9995 \quad (2)$$

人体起立重心轨迹是上述坐标系第一象限的一段曲线,根据式(2),构建如下插补规则^[8]:

(1) 若动点 P 在规划轨迹右侧或规划轨迹上, $f_i \geq 0$,则动点应向 $-x$ 方向进给一个脉冲当量(即向 $-x$ 方向进给一步),则有:

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i - 1 \\ f_{i+1} = y_i - 3.606(x_i - 1)^2 + 2.255(x_i - 1) \\ \quad - 0.9995 \\ \quad = f_i + 7.212x_i - 5.861 \end{cases}$$

(2) 若动点 P 在规划轨迹左侧, $f_i < 0$,则动点向 $+y$ 方向进给一步,则有:

$$\begin{cases} y_{i+1} = y_i + 1 \\ f_{i+1} = (y_i + 1) - 3.606x_i^2 + 2.255x_i - 0.9995 \\ \quad = f_i + 1 \end{cases}$$

(3) 分别判别各坐标轴的进给步数 n_x 和 n_y 。若满足 $n_x = |x_2 - x_1|$, 则水平方向进给终止。竖直方向上的终止条件有两个, 其一是当满足 $n_y = |y_2 - y_1|$ 时终止, 另一是满足减重条件时终止。若不满足终止条件, 返回(1)。

为减轻站立时洗浴者重力对腿和足等部位的压力, 辅助起立的同时进行减重控制。起立过程中实时测试洗浴者重量, 当式

$$G(t) \leq (1 - \delta) G_{\max} \quad (3)$$

满足后, 即满足减重目标, 停止竖直方向的运动。式中: $G(t)$ 为称重传感器实时测试的力; δ 为减重率, 可设为 30%; G_{\max} 为洗浴者入浴和辅助起立过程中, 对脚踏板作用的最大稳定压力(即为洗浴者的重力)。

3 搓澡装置的递阶控制

3.1 搓澡运动及其控制

图 5 所示是搓洗头质点运动按时间展开的轨迹示意图。其中 a 为起点到终点的总幅度, a_1 为前进幅度, a_2 为后退幅度。图 5 所示为一个来回的示意图。其中每一段运动模式采用加速、匀速、减速、停止为一个循环。根据系统的要求, 设置参数如下: 加、减速时间为 0.1s, 匀速运动时间为 15s, 停止时间为 0.2s。

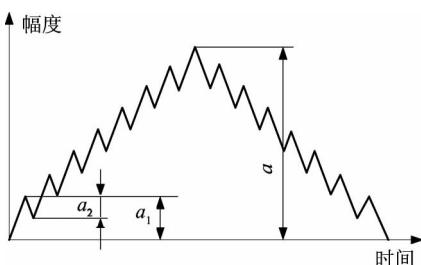


图 5 搓洗头运动轨迹

搓洗装置控制系统采用基于专家系统的递阶控制策略。如图 6 所示, 递阶控制系统上层为专家控

制系统, 它根据洗浴者的资料、历史数据库知识、实测压力等, 通过专家推理决策, 输出搓澡速度和幅度指令; 下层为搓澡系统速度位移控制系统, 包括背部、腿部和臀部搓澡速度位移控制器, 采用 PID 控制, 通过凑试法整定参数, 通过运动控制器的控制函数库实现。

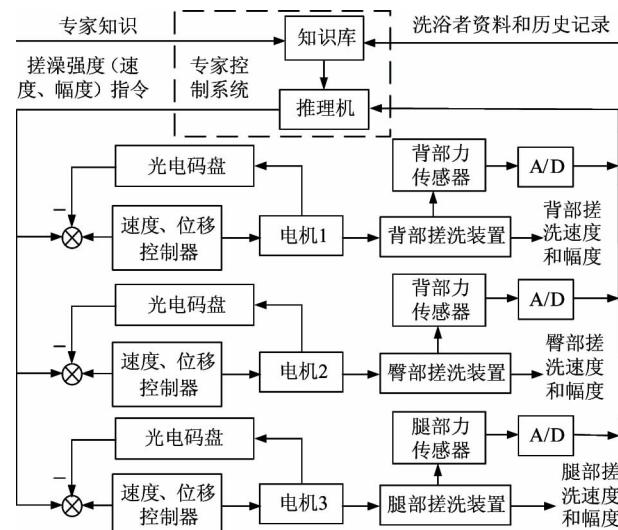


图 6 搓澡装置控制系统框图

3.2 专家系统

搓澡的目的是清洁皮肤, 但搓澡用力过大, 不但造成洗浴者的不适, 还很容易造成皮肤损伤^[9], 因此, 辅助搓洗过程必须控制搓澡的力度。这里提出一个搓澡强度的概念。所谓搓澡强度, 是指在同一洗浴环境下, 用相同的物体与同一洗浴者同一解剖位置皮肤接触搓洗的压力、速度和同向运动幅度等的组合。

在兼顾洗浴效果和效率的同时, 提供不同的搓澡强度以适应不同人的不同耐受性。根据多次实验结果将搓澡强度划分为 1~6 级, 6 级强度最大, 搓澡效率高, 适应皮肤摩擦耐受力强的人, 1 级强度最弱, 搓澡轻柔, 适合皮肤摩擦耐受力弱的人。表 1 所列是划分的搓澡强度。很多学者对人体皮肤的摩擦感知与摩擦条件(主要是摩擦系数和正压力等)、年龄、性别、肥胖程度等密切相关。

表 1 搓澡强度

强度值	平均速度 (m/s)	前进幅度 a_1 (mm)	后退幅度 a_2 (mm)
1	0.010	10	5
2	0.015	20	10
3	0.020	30	15
4	0.025	40	20
5	0.030	50	25
6	0.033	60	30

由于洗浴过程中洗浴者处于准自由状态,搓澡装置在搓澡过程中受到的正压力会随着洗浴者自身调整而动态变化,由搓头固定架上的传感器检测。洗浴者年龄、性别、身高、体重和近期洗浴者的搓澡强度等信息可以输入系统数据库。肥胖程度按中国成人的肥胖标准确定,即:肥胖指数(body mass index,BMI)大于等于 $28\text{kg}/\text{m}^2$ 为肥胖;小于 $28\text{kg}/\text{m}^2$ 且大于等于 $24\text{kg}/\text{m}^2$ 为超重,其他为正常^[11]。

专家控制系统的推理机根据事实库中的数据,结合知识库中的“专家”知识(推理规则)推理出搓澡强度。搓澡强度专家推理规则见表 2。

表 2 搓澡强度专家推理规则

序号	规则
1	洗浴者历史记录的搓澡强度值作为初始值
2	无历史记录的默认搓澡强度值为 3
3	年龄小于 30 岁,搓澡强度值加 2
4	年龄在 30~39 岁间,搓澡强度值加 1
5	年龄在 40~49 岁间,搓澡强度值加 0
6	年龄在 50~59 岁间,搓澡强度值减 1
7	年龄在 60~69 岁间,搓澡强度值减 2
8	年龄 ≥ 70 岁,搓澡强度值减去 3
9	无年龄输入值的搓澡强度值加 0
10	洗浴者是男性,搓澡强度加 1
11	洗浴者是女性,搓澡强度减 1
12	无性别输入值,搓澡强度值加 0
13	BMI < $24\text{ kg}/\text{m}^2$,搓澡强度值减 2
14	$24\text{ kg}/\text{m}^2 \leq \text{BMI} < 28\text{ kg}/\text{m}^2$,搓澡强度值加 0
15	$\text{BMI} \geq 28\text{ kg}/\text{m}^2$,搓澡强度值加 2
16	搓澡压力 $< 10\text{N}$,搓澡强度值加 2
17	$10\text{N} \leq \text{搓澡压力} < 30\text{N}$,搓澡强度值加 0
18	搓澡压力 $> 30\text{N}$,搓澡强度值减 2
19	当搓澡强度 < 1 ,选择搓澡强度为 1
20	当搓澡强度 > 6 ,选择搓澡强度为 6

4 实验

构建如图 7 所示的立式洗浴护理机器人实验样机。用 3 位如表 3 所示的实验对象进行实验。



图 7 立式洗浴护理机器人样机

表 3 实验对象参数

实验对象	年龄(岁)	身高(cm)	体重(kg)	BMI	性别
1	27	176	78.5	25.3	男
2	28	170	62.5	21.6	女
3	27	165	60	22	男

对 1 号实验对象进行辅助起立实验(如图 8 所示)。利用安装在伺服电机输出轴上的光电码盘跟踪记录起立轨迹。图 9 为规划曲线与实测跟踪点的对比图,其中,实线为规划曲线,*点为实测跟踪点(根据光电码盘数据折算得到实验对象的重心距脚踏板的高度值)。从图 9 可见跟踪点基本上和规划曲线重合。另外,其他多次实验中,实验对象也都被机器人完整地辅助起立,所有受试者在实验过程中无不适感。

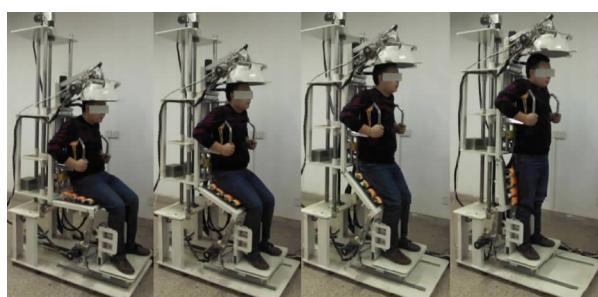


图 8 辅助起立实验

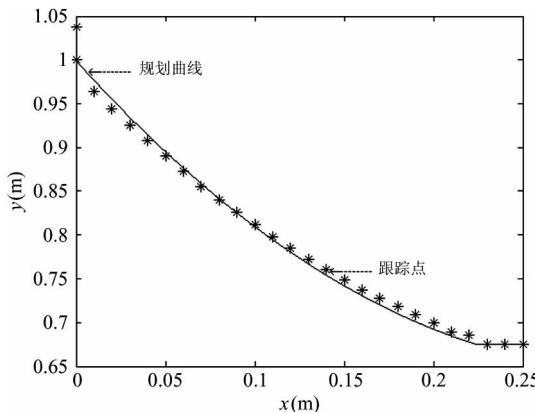


图9 跟踪点与规划曲线

根据表3所示的三位实验对象的参数,按照搓澡强度专家系统的推理规则进行人工离线推理,推理结果如表4所示。将三位实验对象的参数输入洗浴机器人的数据库中在线运行,并通过安装在伺服电机测量轴上的光电码盘实测搓澡头输出的运动参数。其中实测运动参数数据如表5所示。

表4 人工推理结果

实验对象	搓澡强度	速度(m/s)	前进幅度 a_1 (mm)	后退幅度 a_2 (mm)
1	6	0.033	60	30
2	2	0.015	20	10
3	4	0.025	40	20

表5 搓澡模块实验数据

实验对象	前进幅度(mm)	后退幅度(mm)	腿部搓澡速度(m/s)	背部搓澡速度(m/s)	臀部搓澡速度(m/s)
1	62.3	31.2	0.0338	0.0344	0.0325
2	20.7	10.6	0.0162	0.0165	0.0163
3	42.1	20.5	0.0259	0.0261	0.0264

对比表4和表5发现,理论推理的搓澡运动速度与实测值最大误差(绝对值)为0.0016m/s,最大相对误差为5.6%,幅度最大相对误差为6.0%。可见采用基于专家控制的递阶控制系统能够实现搓澡强度的自动调整,实现搓澡柔性化。根据测试者反馈信息,表5所列的实验参数满足测试者的舒适性要求。

5 结论

为满足护理机器人的宜人性要求,研究了立式洗浴护理机器人的控制系统。根据正常人自然起立的重心轨迹信息,规划了向后辅助起立重心轨迹,并以该轨迹作为偏差函数,构建了插补运动控制器。分析和实验结果表明,向后辅助起立基本符合正常人体自然起立习惯。

搓洗装置采用基于专家系统的递阶控制策略,根据人体参数信息,推导出适合洗浴者的搓澡强度,实现对洗浴者的柔顺搓洗。在实验样机上进行试验,理论推理的搓澡运动速度与实测值最大相对误差为5.6%,幅度最大相对误差为6.0%。表明所设计的递阶控制系统,能够根据洗浴者的特点,实现搓澡强度的自动调整,以满足搓澡的个性化要求。

参考文献

- [1] 屠大维,江济良,许砾等. 移动作业助老助残服务机器人无人机协作:认知建模及其应用. 高技术通讯,2012,22(12):1257-1263
- [2] 白大鹏,张立勋. 助行机器人起坐机构运动分析及实验. 机器人,2013,35(6):757-761
- [3] Beer J M, Springman J M, McBride S E, et al. Needs assessment for certified nursing assistants providing personal care. In: Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 55th Annual Meeting, Santa Monica, USA, 2011. 291-295
- [4] Satoh H, Kawabata T, Sankai Y. Bathing care assistance with robot suit HAL. In: 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Piscataway, USA, 2009. 498-503
- [5] Guay M, Desrosiers J, Dubois M F. Does the clinical context affect the validity of bathroom recommendations made by home health aides?. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2010, 40(1):82-89
- [6] Mohsen S, Mehran E A, Fariba B, et al. Trajectory of human movement during sit to stand: A new modeling approach based on movement decomposition and multiphase cost function. *Experimental Brain Research*, 2013, 229(2):221-234

- [7] 韩建海,付东辽,胡志刚. 卫生护理机器人自动减重系统设计与研究. 机械设计与制造,2013,(12):41-43 320
- [8] 吴常铖,宋爱国,李会军等. 一种上肢康复训练机器人及控制方法. 仪器仪表学报,2014,35(5):999-1004
- [9] 樊鸣鸣,李宏凯,弓娟琴等. 性别和解剖部位对人体皮肤摩擦性能的影响. 摩擦学学报,2010,30(3):315-232
- [10] 李炜,蒋玉石,庞强等. 不同性别人体皮肤摩擦不舒适度感知功能的研究. 摩擦学学报,2012,32(3):227-232
- [11] 中国肥胖问题工作组. 中国成人超重和肥胖症预防与控制指南(节录). 营养学报,2004,26(1):1-4

Movement control of a vertical bathing-care assistant robot

Shang Zhendong*, Zhang Xiaolan**, Hu Zhigang**

(* School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003)

(** School of Medical Technology and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003)

Abstract

To meet nursing-care assistant robots' need for humanization design, the movement control of a bathing-care assistant robot was studied, and a movement control method based on the information of body size and motion state was proposed. The bathing-care assistant robot with the proposed control mechanism adopts a vertical, mobile seat architecture consisting of a standing assistant device, a scrubbing device, a water circulating device and baffle plates to support users' bathing in the gestures of standing and sitting; plans the track of gravity center of body according to normal standing process of people, uses its fitting function of the track as the deviation function to establish the interpolation motion controller to make it applicable to different heights with the weight reduce control; and applies a hierarchical control strategy based on an expert system to the scrubbing device to realize the personalized scrubbing on back, buttocks and legs of users. The inference engine of the expert system could determine the scrubbing strength by inference and decision according to users' body parameter information, historical knowledge and real tested data in the database. Experiments were conducted to verify the proposed design, and the results proved the feasibility of the designed robot control system.

Key words: service robot, nursing-care assistant robot, bathing, intelligent control, expert system