

基于规则进化模糊系统的步行方向意图识别*

赵东辉¹, 杨俊友¹, 王义娜¹, 王硕玉²

(1. 沈阳工业大学电气工程学院 沈阳 110011; 2. 日本高知工科大学智能机械电子学院 高知 7828502)

摘要:为了准确识别下肢功能障碍患者自主步行康复训练过程中的方向意图,提出了一种能够兼顾使用者个体差异及安全状态的新型步行方向意图识别方法。首先论述了康复训练机器人结构及患者前臂对机器人支撑板的压力和步行方向意图的关系。为保证患者安全地向任意方向行走,提出根据膝盖旋转角度推理安全步态的先决条件下,基于距离型模糊推理算法设计具有稀疏前件规则库的步行方向意图识别方法;然后为减小因个体差异、非稳定模糊规则引起的识别误差,提出规则进化算法实时优化模糊推理规则库。最后将该算法进行了多方向模糊推理实验与步行康复训练机器人压力控制实验,实验表明该算法可以准确识别下肢功能患者的任意步行方向意图并提高了步行的安全性,提出的步行方向意图识别方法可以应用在下肢功能障碍人士的日常起居与康复训练中。

关键词: 距离型模糊推理算法; 规则进化算法; 步行康复训练; 方向意图识别

中图分类号: TH7 TN911.72 TP242.6 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.40

Fuzzy system based on the rule evolution strategy for directional intention identification of walking

Zhao Donghui¹, Yang Junyou¹, Wang Yina¹, Wang Shuoyu²

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Department of Intelligent Mechanical Systems Engineering, Kochi University of Engineering, Kochi 7828502, Japan)

Abstract: In order to accurately identify the directional intention of lower limb functional disorder patients, a novel walking directional intention identification strategy is proposed considering individual differences and safety. Firstly, the structure of rehabilitation robot and the relationship between the pressure of the forearm and the directional intention are introduced. To ensure the patient to walk safely in any directions, a distance-type fuzzy reasoning algorithm with sparse antecedents is adopted under the prerequisite for reasoning about safe gait through rotation angle of knees. Then, to reduce the identification errors caused by individual differences and non-stable fuzzy rules, this paper proposes a rule evolutionary strategy, which can update the fuzzy inference rules. Finally, the algorithm is applied to multi-objective fuzzy reasoning experiments and pressure control experiments of walking rehabilitation robot, which prove that the algorithm can accurately identify arbitrary directional intention of patients and increase walk safety. This strategy of directional intention identification can be used in the rehabilitation of lower limb dysfunction in daily living and rehabilitation training.

Keywords: distance-type fuzzy reasoning; rule evolution strategy; walking rehabilitation; directional intention identification

0 引 言

在下肢功能障碍患者的日常起居与下技术后康复过程中,康复机器人可以极大减轻患者与理疗师负担,提高训练效率与持续时间被广泛应用。在患者行走的过程中

如何准确识别患者运动方向意图是重要内容之一^[1]。近年来,针对于下肢康复机器人的交互策略研究领域,国内外学者已经提出一些意图识别方法,如手柄操纵,语音交互及生物电信号交互等方法^[2-5]。使用操作手柄经常被用来识别使用者的方向意图,但当患者在康复训练过程中专注于控制操作手柄具有困难和危险性^[3]。语音识

别方法通过深层神经网络技术可以准确识别人类语言,已经被应用在了智能家居领域^[4-5],但是对于非明确位置与方向模糊化情况很难进行准确的语言表达与识别^[4]。表面肌电信号(surface electromyography, sEMG)因其蕴含信息丰富,无创采集技术成熟,被众多研究者采用识别步行意图^[6]。其中,Ueda J等人^[7]通过建立肌肉活跃度、肌肉收缩、肌骨几何、关节动力/运动学等子模型的神经肌骨动力模型,可以有效识别连续运动关节力矩、角速度、角度等,其模型被广泛应用在外骨骼机器人中。但是下肢功能障碍患者日常应用过程中反复穿戴肌电装置麻烦,而且由于sEMG信号的高度时变性^[8],下肢功能缺失导致信号个体差异性较大^[9],从而使系统稳定性受到影响。为提高患者使用的便捷性,文献[10-11]提出一种基于压力的模糊推理的方向意图识别方法,但由于下肢功能障碍患者行走习惯、调整身体重心能力差别较大导致系统对不同的患者推理精度不足;而且该方法并未考虑步行过程中最容易发生的跌倒、移动平台拖拽患者所引发危险状况。

本文将距离型模糊推理算法引入到全方向康复训练机器人当中并结合操作者实时的步行状态,建立一种兼顾个体差异性与安全性的新型方向意图识别方法。通过膝盖旋转角度对跌倒等异常行为进行识别。在确保使用者安全行走的前提下,基于方向意图以及对应的前臂压力信息构造方向意图识别知识库。针对建立的知识库具有稀疏特性,提出距离型模糊推理识别算法进行任意步行方向意图推理,提出子模糊规则进化算法实时优化模糊推理知识库,并基于知识半径理论提高步行方向意图识别精度。通过本方法患者不需要刻意操作即可将方向指令输入给机器人,从而提高患者行走过程中的安全性;与脑电信号或肌电信号交互方法所使用的昂贵生物测量系统相比成本更低;具有压力支撑板的步行康复训练机器人可以在患者康复训练过程中提供支持、减重功能,在避免行走过程中跌倒等危险行为的同时,提高下肢功能障碍患者的康复效果。经验证,本文提出的算法可以准确识别患者任意方向步行意图与行走过程中的跌倒行为,该步行意图识别方式可应用于下肢功能障碍人士的日常生活与康复训练中。

1 腿部旋转角度与前臂压力测试

下肢功能障碍患者在行走中使用的全方向步行康复训练机器人如图1所示,该机器人具有辅助患者起立、行走、康复训练等多个功能。将4个压力传感器嵌入步行康复训练机器人的支撑板中如图2所示,定义4个压力传感器测量的压力值分别为 p_{fl} 、 p_{fr} 、 p_{bl} 和 p_{br} ,基于4个压力传感器检测使用者腕部、肘部对支撑板的压力。如图3所示,当使用者进行日常助行或自主康复训

练过程中,将前臂放在压力板上,根据自身目标方向自然调整双臂,其中压力传感器测量手腕和肘部的压力值,将2个陀螺仪固定在被测试者的腿部,用于检测行走过程中的腿部旋转信息,来判断跌倒状态。



图1 全方向康复训练机器人

Fig. 1 Omni-directional rehabilitation training robot

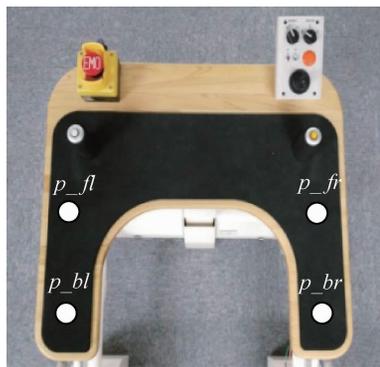


图2 压力传感器位置

Fig. 2 Position of pressure sensors



图3 步行训练方法

Fig. 3 Method of walking training

为分析步行过程中使用者的方向意图与压力传感器的关系,根据压力传感器测量信息计算患者前臂压力分

布情况如图 4 所示。4 个压力合力矢量为 $f(f, \theta)$, 其大小 f 和角度 θ 如式(1)、(2)所示。

$$f = \sqrt{fl_{br}^2 + fr_{bl}^2} \tag{1}$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{fl_{br}}{fr_{bl}}\right) + \frac{3\pi}{4} - \text{sgn}(fr_{bl}) \frac{\pi}{2} \tag{2}$$

式中: $fl_{bl} = p_{fl} - p_{br}$ 和 $fl_{br} = p_{fr} - p_{bl}$ 。

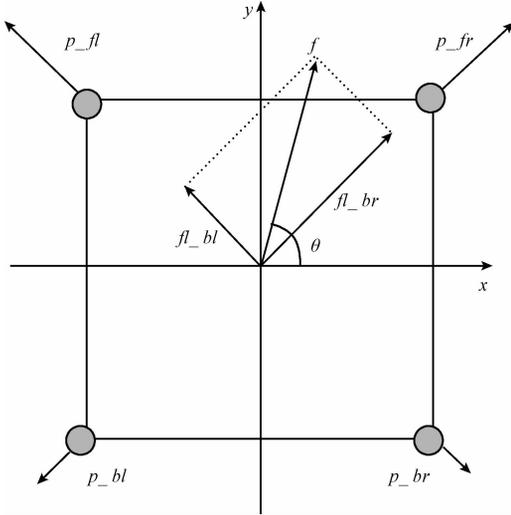


图 4 前臂压力矢量合成方法

Fig. 4 Synthetic method of forearm pressure vectors

实验共选择八 8 名身高在 170 ~ 180 cm, 体重在 60 ~ 90 kg 的 20 ~ 25 岁健康男性志愿者对通过前臂压力控制步行康复训练机器人实现任意方向行走, 其中定义平面坐标内 8 个方向为机器人运动参考方向, 分别为 0° (R)、 45° (FR)、 90° (F)、 135° (FL)、 180° (L)、 225° (FL)、 270° (B)、 315° (BR)。对 8 个方向进行实验, 如图 5 所示为任选 2 名测试者朝 0° (R)、 45° (FR)、 315° (BR) 3 个方向移动时的前臂压力合成值。在坐标系内, x 轴与 y 轴为压力传感器的输出值, 按照图 4 方法合成前臂压力。由于被实验者初始状态并没有任何方向意图, 因此压力传感器的初始值设定为零点, 当检测到压力值有明显变化时, 方可对被实验者方向意图进行计算。

图 5 (a)、(b) 所示为两个测试者朝 FR、R 和 BR 3 个方向移动时的压力合成值。该合成值反映了测试者的压力值及压力分布特性, 同时反映了前臂压力与方向意图存在相关性。当测试者的目标方向为 FR、R 和 BR 时, 相比于坐标系内定义的右前* (45°)、右* (0°)、右后* (-45°) 方向, 可以观察到合成的前臂压力整体具有向后偏的趋势。因为使用者在使用步行康复训练机器人时, 习惯于将大部分身体压力集中在肘部, 这样使得肘部压力大于腕部压力, 这种受力分布模式使测试者可以更加方便自然地支持自身重量。

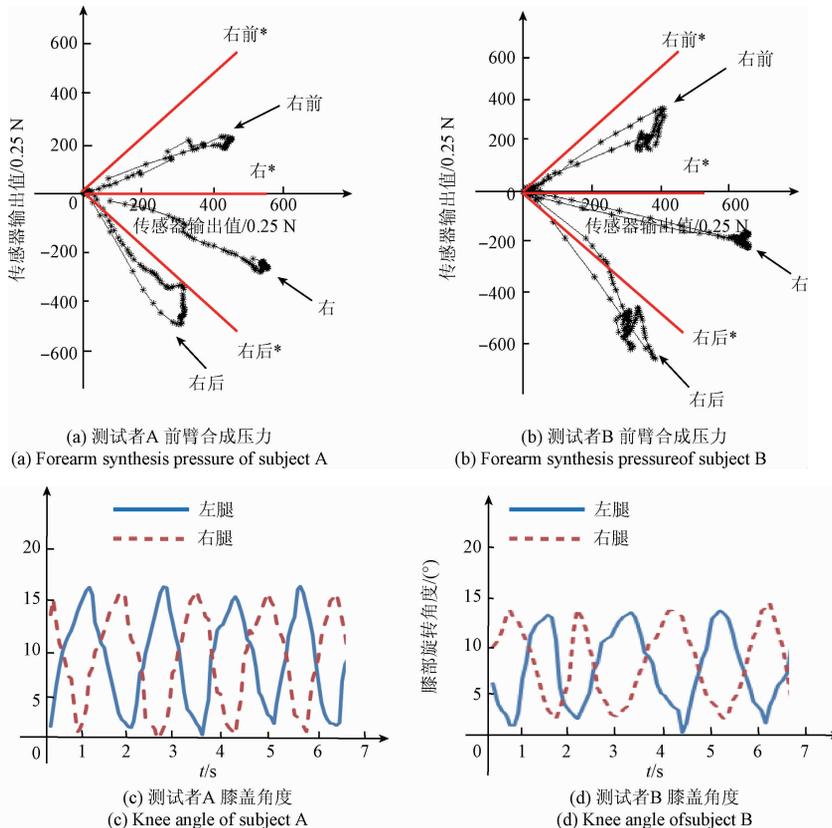


图 5 被测试者 A 和 B 的前臂合成压力与腿部运动信息

Fig. 5 The forearm synthesis pressure and leg movement information of sample A and B

当使用机器人行走时,测试者腿部 x 轴旋转角度最为明显,因此定义左右腿的旋转角度为 ω 和 ξ ,如图 5(c)、(d) 所示,双腿角度信息成周期性变化。当发生跌倒等意外情况时,双腿角度骤然增加。因此,基于角度变化值推理步行过程中的跌倒行为。

测试者由于个人行走习惯及身高、体重差异等原因,在行走的过程中对支撑板的压力值、施加压力分布及特性存在差异,因此,借助前臂压力合成值和方向意图趋势关联性简单判别步行方向意图存在推理精度不足。为此,提出基于规则进化策略的双层混合型模糊推理算法,在考虑跌倒状态的前提下,实现对不同使用者方向意图的准确识别。

2 基于规则进化策略的双层混合型模糊推理系统

2.1 双层混合型模糊推理系统

通过腿部信息识别跌倒等异常行为并构造一层模糊推理系统,从而确保测试者在使用步态康复机器人的安全性。通过前臂压力识别步行方向意图,基于合成力信息构造模糊规则,作为二层模糊推理算法的规则库。双层混合型模糊推理系统框图如图 6 所示,当一层模糊推理系统确认测试者未发生跌倒等异常行为时,触发开关 T,全方向康复训练机器人按照识别步态方向运行。

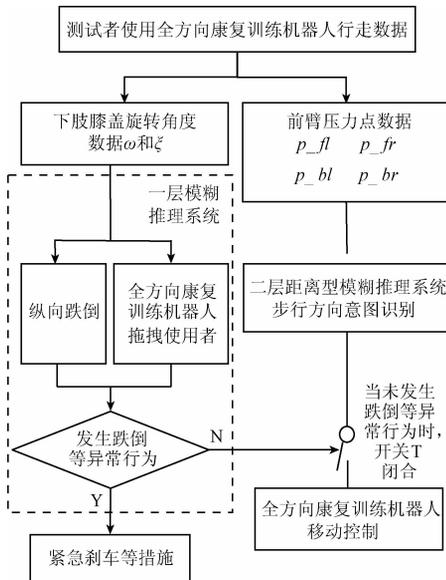


图 6 双层混合型模糊推理系统框图

Fig. 6 Systematic chart of double mixed typed fuzzy inference system

2.2 距离型模糊推理

模糊推理算法采用模糊集合论为基础描述工具对以集合论为基础描述工具的数理逻辑进行扩展,可以对不

确定系统进行有效推理^[12]。目前为止,存在许多类型的模糊推理方法,如 Mamdani 的模糊推理^[12]、功能模糊推理^[13-14]等被广泛应用于模糊控制和模糊专家系统^[15]。这些模糊推理方法称为直接方法,主要基于事实和前件的兼容性等级构造隶属度进行推理。某些模糊系统中,规则库中包含若干个前件模糊集合交集为空集的稀疏前件,因此基于隶属度值对具有稀疏前件的模糊集推理并不适用。在步行方向意图识别系统中,由于根据 4 个压力值建立具有稀疏前件的模糊推理规则,无法构造隶属度进行推理,所以传统的模糊推理算法不能应用于步行方向意图识别系统中。因此,本文提出在推理出安全步态的前提下,基于距离型模糊推理方法进行方向意图推理。

模糊规则建立方法如下:

$$\text{Rule}^i: \text{if } x_1 = A^1, x_2 = A^2, \dots, x_m = A^m,$$

$$\Rightarrow y = B^i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$\text{Fact}: x_1 = A^1, x_2 = A^2, \dots, x_m = A^m$$

$$\text{Result}: y = B$$

其中,系统的推理前件、结果、事实变量和推理结果的模糊集分别由 A^j, B^i, A^j, B 表示, $i \in [1, n], j \in [1, m], m$ 为前件模糊集合个数, n 为模糊规则个数。距离型模糊推理是基于模糊集 A^j, B^i, A^j, B 和事实中的 A^j 的规则距离进行推理^[16-17]。通过经验值构建三角形模糊集 A , 输入事件作为模糊单值 S 。

$$d(A, S) = \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_{j=1}^2 \left[\sum_{i=1}^{j+1} (a_j - s)^2 + \prod_{j=1}^{j+1} |a_j - s| \right]^{1/2}$$

$$i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

三角形模糊集 A 与模糊单值 S 之间的距离如图 7 所示。参数 a_1, a_2, a_3 来定义三角形模糊集 A , 分别为 8 个被实验者压力测量值的平均值加方差, 平均值, 平均值减方差。根据式(3)量化三角形模糊集与单值型模糊集的距离作为模糊推理依据。由于 4 个压力传感器检测的压力时序信号差别较大, 因此, 基于前臂压力建立的模糊集具有稀疏性的特点。距离型模糊推理算法包括 3 个计算步骤。

1) 计算前件之间的距离 $d_{ij}(A^j, A^i)$, 其中 A_{ij} 和 A_j 如图 7 所示, 然后计算 d_1 到 d_n 如下:

$$d_i = \sum_{j=1}^m d_{ij}(A^j, A^i) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

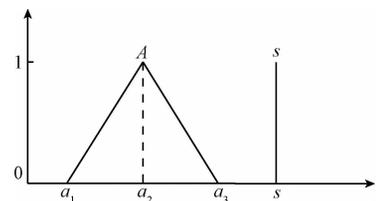


图 7 三角形模糊集与模糊单值

Fig. 7 Triangle-type fuzzy set and singleton

2) $\forall \alpha \in [0, 1]$, 计算 α 级推理集合结果 B 如下, 其中 $\sup B_\alpha$ 是子集的上限, $\inf B_\alpha$ 为下限:

$$B_\alpha = [\inf B_\alpha, \sup B_\alpha]$$

$$\inf(B_\alpha) = \frac{\sum_{i=1}^n [\inf(B_\alpha^i \prod_{j=1, j \neq i}^n d_j)]}{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1, j \neq i}^n d_j} \quad (5)$$

$$\sup(B_\alpha) = \frac{\sum_{i=1}^n [\sup(B_\alpha^i \prod_{j=1, j \neq i}^n d_j)]}{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1, j \neq i}^n d_j} \quad (6)$$

3) 根据式(7) 获得推理结果 B 。

$$B = \bigcup_{\alpha} \alpha \cdot B_\alpha \quad (7)$$

距离型模糊推理算法有以下特点:

(1) 距离型模糊推理适用于稀疏模糊规则, 如果模糊规则的推理结果为凸集, 那么推理结论也为凸模糊集。

(2) 推理过程严格满足如下特性, 即如果 $A^i = A^q$, $\exists q \in \{1, 2, \dots, n\}$, 那么 $B = B^i$ 。

(3) B 代表距离是 $d_1, d_2, \dots, d_q, \dots, d_n$ 的推理结果, B' 表示当距离为 $d_1, d_2, \dots, d'_q, \dots, d_n$ 的推理结果。

如果 $d(B, B^q) < d(B', B^q)$, 那么可得到 $d_q < d'_q$ 。当事实越接近某一规则前件, 结论越接近该前件对应的推理结果, 即距离型模糊推理满足渐近特性。

2.3 规则进化算法

根据模糊规则建立方法, 通过大量测试者的压力值建立模糊规则推理系统。考虑到使用者由于使用习惯存在前臂压力值差异、压力集中区域差异, 提出规则进化算法对模糊规则库进行实时优化, 提高模糊推理精度。该算法的步骤如下:

1) 设定示教信号前件 $A'_{fr}(k), A'_{fl}(k), A'_{br}(k), A'_{bl}(k)$ 与对应后件为 $\beta^i(k)$, 将示教信号前件 $A'_{fr}(k), A'_{fl}(k), A'_{br}(k), A'_{bl}(k)$ 输入到建立的模糊推理系统 $A^1(k), A^2(k), A^3(k), A^4(k) \Rightarrow \beta^i$ 中, 得到模糊推理结果为 $\beta(k)$ 。

2) 计算示教结果 $\beta^i(k)$ 与推理结果 $\beta(k)$ 的差值 $\beta^i(k) - \beta(k) = \Delta\beta'(k)$ 。

3) 如果 $|\Delta\beta'(k)| \leq \varepsilon$, 返回到第一步做下一示教信号的模糊推理, 其中, $\varepsilon \geq 0$ 为指定误差阈值。

4) 如果 $|\Delta\beta'(k)| > \varepsilon$ 并且满足 $|d_q| \leq \sigma$, 其中 σ 为规则相似度, d_q 为规则库中第 q 个规则与示教系统中某个规则的距离, 即满足规则库中第 q 个规则与示教系统中的某个规则相似度在设定区间内, 直接将建立的规则库的第 q 个推理结果改为 $\beta^i(k)$; 如果 $|\Delta\beta'(k)| > \varepsilon$ 并且满足 $|d_q| \geq \sigma$, 返回到程序开始对规则库升级, 增加规则。式(8)为新的模糊推理集。

$$A'_{fr}(k), A'_{fl}(k), A'_{br}(k), A'_{bl}(k) \Rightarrow \beta^i(k) + \Delta\beta'(k) \quad (8)$$

由于下肢功能性障碍患者的对于步行康复机器人的使用习惯不同, 会造成步行方向意图识别误差。通过实时优化规则库, 并确保推理规则间不互斥, 建立针对不同患者的步态方向意图识别系统, 提高系统的兼容性。

3 实验与分析

3.1 模糊推理规则库

当测试者操作康复机器人进行 8 个方向的行走时, 两个膝盖部位旋转角度值为 ω 与 ξ 。在步行康复训练的过程中, 最容易发生的危险事故有两种情况: 跌倒或者机器人速度过快拖拽使用者发生跌倒的情况。如图 8(a)、(b) 所示, 发生跌倒、拖拽测试者情况时, 膝部角度骤然增大。设定正常行走膝盖角度阈值 δ , 当 $\delta \geq 35^\circ$, 设定为跌倒等异常行为; 当 $\delta < 35^\circ$, 则为正常步态。根据膝盖旋转角度推理出测试者的行为可以确保步态训练的安全性。

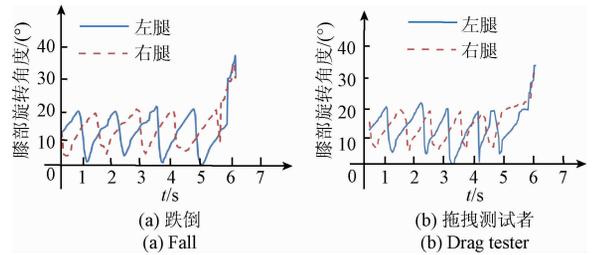


图 8 跌倒等异常行为的膝盖旋转角度
Fig. 8 Fall and other abnormal behavior

4 个压力传感器的测量值 p_{fl}, p_{fr}, p_{bl} 和 p_{br} 的平均值与标准差如表 1 所示。以三角形模糊推理集构建方法如图 7 为例, 根据表 1 平均值与标准差分别构造三角形模糊集 A , 它的 3 个端点分别为 (平均值-标准差, 0)、(平均值, 1)、(平均值+标准差, 0)。

$$\begin{aligned} \text{Rule}^i: & \text{if } p_{fr} = A'_{fr}, p_{fl} = A'_{fl}, \\ & p_{br} = A'_{br}, p_{bl} = A'_{bl} \\ & i = 1, 2, \dots, 8 \\ & \Rightarrow y = \beta^i i \in [1, 8] \end{aligned} \quad (9)$$

根据式(9) 建立模糊规则, 其中 i 代表规则 1~8, β^i 代表推理方向意图。列举 3 个模糊规则 Rule1、Rule2 和 Rule8 的规则前件表示如图 9 所示。其中, 以图 9(a) 规则 1 前件 A'_{fr} 模糊集为例, 三角形模糊集的端点分别为 (164.3, 0)、(219.6, 1)、(274.9, 0)。根据表 1 中采集的 8 位健康测试者的压力点的平均值与方差建立 8 个模糊规则, 并将 8 个方向的推理规则建立如下模糊推理规则库。

表1 八方向压力传感器输出平均值与标准差

Table 1 Mean and standard deviation of pressure sensors of eight directions

方向	p_{-fr}		p_{-fl}		p_{-br}		p_{-bl}	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
R	219.6	55.3	16.9	14.7	461.2	160.5	80.9	43.7
FR	301.2	61.7	24.0	19.2	126.8	108.6	27.6	21.4
F	267.4	50.4	256.5	49.6	52.6	46.8	72.1	46.1
FL	16.8	10.4	344.6	97.6	42.8	38.2	148.5	79.8
L	6.4	5.6	201.8	58.4	76.3	53.4	463.2	108.4
BL	4.5	2.7	77.8	31.4	79.3	27.5	612.4	156.9
B	3.5	1.9	21.2	10.6	467.9	109.9	451.5	82.4
BR	70.8	32.1	4.8	3.7	585.2	180.4	104.4	40.9

Rule1: if $p_{-fr} = A_{fr}^1, p_{-fl} = A_{fl}^1, p_{-br} = A_{br}^1, p_{-bl} = A_{bl}^1 \Rightarrow y = \beta^1$

Rule2: if $p_{-fr} = A_{fr}^2, p_{-fl} = A_{fl}^2, p_{-br} = A_{br}^2, p_{-bl} = A_{bl}^2 \Rightarrow y = \beta^2$

Rule3: if $p_{-fr} = A_{fr}^3, p_{-fl} = A_{fl}^3, p_{-br} = A_{br}^3, p_{-bl} = A_{bl}^3 \Rightarrow y = \beta^3$

⋮

Rule8: if $p_{-fr} = A_{fr}^8, p_{-fl} = A_{fl}^8, p_{-br} = A_{br}^8, p_{-bl} = A_{bl}^8 \Rightarrow y = \beta^8$

由于规则库中包含8个稀疏前件的模糊规则,因此稀疏模糊规则库具有稀疏特性,推理结果如式(10)所示。

$$R: \beta^1 = 360 \times l + 0, RF: \beta^2 = 360 \times l + 45$$

$$F: \beta^3 = 360 \times l + 90, LF: \beta^4 = 360 \times l + 135$$

$$L: \beta^5 = 360 \times l + 180, BL: \beta^6 = 360 \times l + 225$$

$$B: \beta^7 = 360 \times l + 270, BR: \beta^8 = 360 \times l + 315$$

$$l = -1, 0, 1$$

(10)

由表1建立的模糊规则库是由8位健康测试者压力点的平均值与方差所建立的统计结果,其中个体差异性并没有考虑到其中。下肢功能障碍患者由于病情原因使用机器人的习惯完全不同,因此,需要先建立泛化能力强的标准规则库而后当患者使用时,规则库通过进化算法自适应于患者个体特性。

3.2 多方向模糊推理实验

在确保一阶模糊推理系统识别安全步行状态前提下,根据距离型模糊推理算法,通过提取8个测试者的4个压力传感器值进行推理,其中R、RF和BR3个方向的推理角度如表2所示。

表2 多目标角度推理结果

Table 2 Multi-objective reasoning results

方向	p_{-fr}	p_{-fl}	p_{-br}	p_{-bl}	角度/(°)
R	191.6	2.8	622.8	147.8	1.3
	197.8	0.0	537.4	76.8	3.7
	220.8	0.0	491.2	68.2	6.6
	261.4	0.0	451.8	66.6	10.2
	329.0	0.0	698.8	151.2	7.8
	179.2	6.3	497.3	119.8	2.9
	342.0	1.9	708.5	142.2	8.1
	165.7	0.0	198.3	49.7	25.7
FR	289.7	34.1	293.2	76.8	45.7
	309.8	34.2	62.1	35.2	62.0
	310.7	48.9	58.1	46.8	64
	379.1	42.5	22.8	7.4	64.4
	289.9	11.8	129.3	31.5	56.4
	201.6	18.9	78.2	34.6	62.4
	239.7	27.5	301.4	139.0	44
	324.3	26.7	159.7	50.1	55.8

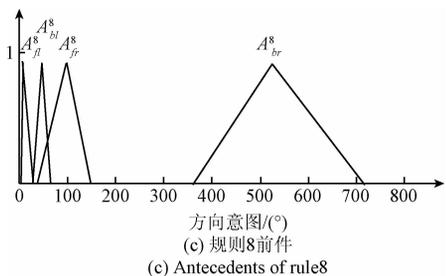
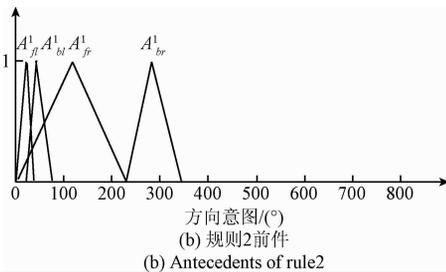
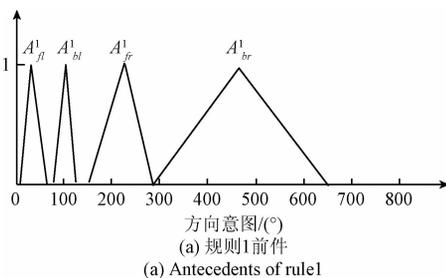


图9 FR、R、BR方向前件

Fig. 9 FR, R, BR of antecedents

续表 2

方向	p_{fr}	p_{fl}	p_{br}	p_{bl}	角度/(°)
BR	45.8	0.0	471.3	106.5	334.2
	197.6	0.0	815.9	153.8	338.8
	58.4	5.6	592.3	61.8	333.7
	50.8	10.8	275.6	71.6	344.8
	100.4	0.0	721.6	142.8	333.3
	21.7	0.0	251.6	71.9	344.8
	41.2	0.0	491.5	71.8	335.3
	168.6	4.0	588.4	178.4	336.3

具体推理过程以 R 方向第 1 名被测试者为例,根据表 1 通过被测试者 4 个压力点数值,计算出 4 个压力点与前件的距离。距离型模糊推理满足渐近特性。例如,输入事实到 Rule1 与 Rule8 的距离小于其他规则,基于渐近特性的预期方向应该在 R 方向和 BR 方向之间。当计算推理角度时,如果 R 指定为 0°和 BR 被指定为 -45°,则结论 $\beta \in (0, -45)$,即在 R 方向和 BR 方向之间。但是,如果 R 指定为 0°和 BR 指定为 315°,则结论 $\beta \in (0, 315)$,由于方向间跨度较大,并不能推理具体角度。因此,为了提高角度辨识精度,分别设定具体方向角度。

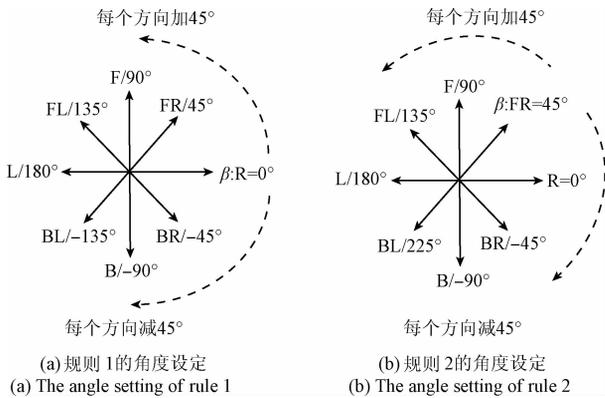


图 10 角度设定方法

Fig. 10 The angle setting method

在模糊推理中,设定推理结果为 $\beta \in [0, 360]$,指定其他方向的角度为 $\gamma \in (\beta - 180, \beta + 180)$ 。如图 10(a)所示,当推理结果 β 与 Rule1 有最小距离时,设定 $\beta^1 = 0^\circ$,那么 $\beta^1 \sim \beta^8$ 依次为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, -135^\circ, -90^\circ, -45^\circ$;如图 10(b)所示当推理结果与 Rule2 有最小距离时,设定 $\beta^2 = 45^\circ$,那么 $\beta^1 \sim \beta^8$ 依次为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, -90^\circ, -45^\circ$ 。表 2 实验结果表明,尽管在相同方向的意图推理中,不同测试者的前臂压力存在差异,但 8 个测试者的前臂压力与相应的推理结果非常接近于测试者本身方向意图。推理结果与方向意图存在着误差,但距离型模糊推理算法总体上识别出了 8 个步行方向意图。

其中,在第 8 个测试者的 R 方向上出现方向意图识别误差。为了消除误差,第 1 个目标点的右侧行走实验中前臂压力被测试 3 次,结果如表 3 所示,将压力数据前两行作为进化规则推理集重新优化模糊规则库, ε 被设定为 20。压力数据的第 3 行为测试者的方向意图进行重新测试。在执行规则进化算法后,第 3 行数据为推理结果分别为 24.5° 与 13.7° ,经验证推理误差明显减少。

表 3 目标 1 的前臂压力

Table 3 The forearm pressure of target 1

p_{fr}	p_{fl}	p_{br}	p_{bl}
202.4	0.0	341.7	55.8
283.6	5.2	431.5	72.1
190.5	0.0	225.6	51.9

实验证明在相同方向的意图识别实验中,8 位测试者的平均压力截然不同,但推理方向接近于其预期方向,证明本文提出的方法可以被用来识别步行方向意图,但是推理结果与真实意图间存在着误差。8 位测试者预期方向与推理结果之间偏差的平均值与标准差如表 4 所示。造成推理误差的主要原因有以下几点:

1) 测试者本身不能将抽象化的方向识别成为具体的角度,因为方向在日程生活中是一个十分模糊的概念。当测试者使用机器人行走时,往往按照主观意愿沿大致方向行走。

2) 测试者并不能精确的控制前臂压力。当测试者控制机器人朝目标方向行走时压力点值会变化从而造成行走路线变化,当测试者发现方向偏移时会自主修正行走方向。

3) 模糊规则库的建立依赖于 8 位健康测试者的统计实验结果,个体差异性并未考虑其中。实验结果验证了规则进化策略可以使推理系统适应个体特征,从而使步行康复机器人适应特定行走困难的人,增强了系统的泛化性。

表 4 预期方向与推理结果间误差

Table 4 Errors of intended directions and Reasoning results

	R	FR	F	FL	L	BL	B	BR
平均值	6.8	11.8	8.4	12.3	9.1	15.6	9.3	22.7
标准差	4.1	8.1	2.6	6.6	5.2	7.4	3.6	4.7

为了提高推理精度,采用知识半径理论来提高推理精度,即选择规则库中特定规则推理方向意图^[17-18]。知识库的应用会影响到推理的合理性。当人们通过推理系

统得出结果时,只有当知识库与事实相关的时候才能被应用。如果使用知识库中与事实不相关或相关性较少的规则会造成推理精度低。因此,选择性的使用知识库在减少计算的同时可以提高推理的准确度。用知识半径 r 来定义规则库中所使用的规则数量,即($r=2,3,\dots,8$)。采用知识半径理论进行距离型模糊推理并不会用到规则库中8个规则,只会用 r 个规则,并且这 r 个规则到事实的距离小于其他规则。当 r 分别为2,3,4, \dots ,8),采用表2中的实验数据进行推理时,8个方向预期方向与推理角度的平均值与偏差如表5所示。

表5 预期方向与推理结果间误差

Table 5 Errors of intended directions and Reasoning results

r	2	3	4	5	6	7	8
平均值	12.9	14.3	8.2	11.6	17.4	13.8	21.6
标准差	5.6	9.1	4.9	8.5	11.4	10.7	5.9

表5说明当知识半径为4时,推理精度最高,即当使用规则库距离事实最近的4个规则进行推理时,推理精度要高于采用规则库中的8个规则进行推理。因此,对表2中的压力数据重新推理并采用知识半径为4时,8个测试者在R、FR、BR 3个方向推理角度误差如图11所示。相比于预期方向,在R方向上推理误差小于 5° ;在FR方向上,推理误差小于 8° ;当在BR方向,推理误差相对与R,FR方向较大为 16° 。实验证明推理系统可以描述出前臂压力与步行方向意图间的关系。

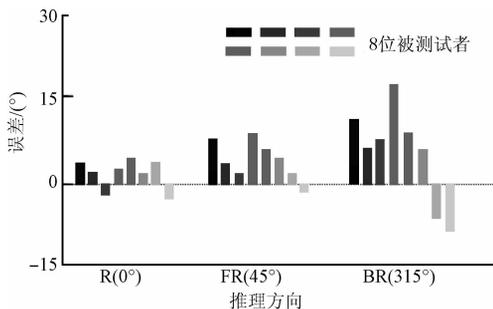


图11 R、FR、BR方向推理误差

Fig. 11 Reasoning errors of R, FR, BR

3.3 步行康复训练机器人压力控制实验

为了验证基于规则进化策略的模糊推理算法的在步行康复训练过程中的有效性,对3位测试者进行前臂压力控制机器人进行多方向步行路径追踪实验。其中,一名25岁成年男性根据地面路径使用步行康复训练机器人进行8个方向的行走,目标根据地面标记轨迹进行 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 正方形, $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 菱形顺时针行走如图12、13所示,在此过程中,4个压力传感器测量值随时间变化如

图14、15所示。基于双层混合型推理系统,测试者操作康复机器人的推理方向与目标方向对比如图16、17所示。根据测试者前臂压力值控制康复机器人向不同的方向行走时,推理角度基本维持在目标角度区间。图17中,在10~15 s,方向意图点出现抖动,由于当康复机器人移动到右后侧时,测试者调整重心,通过自我调整前臂压力达到行走稳定的状态,从而造成了意图识别波动,但波动维持在 315° 的行进范围中,并没有对实验结果带来影响。对3名测试者操纵步行康复训练机器人行走菱形,圆型的行走路线进行追踪并与目标路径进行对比,如图18所示,3名测试者的行走路径与目标路径拟合。其中,行走路线发生偏差,是由于操作过程中手臂压力不稳定以及室内地毯摩擦力增加了路径行走的偏差,但实验证明采用的方向意图推理系统可以准确的识别行走过程中的方向意图,可以满足日常生活中在室内的行走与康复训练。



图12 正方形目标路径

Fig. 12 Square target path

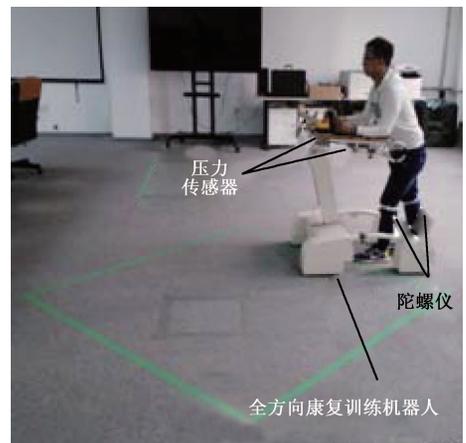


图13 菱形目标路径

Fig. 13 Diamond target path

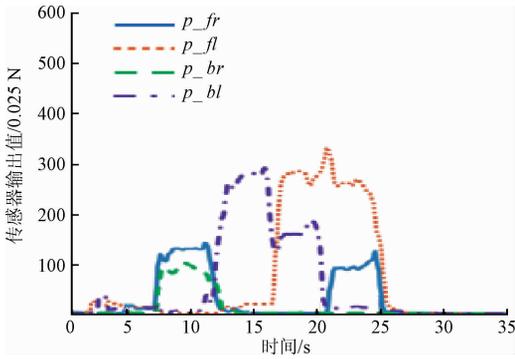


图 14 正方形路径传感器输出值
Fig. 14 Sensors' output of square path

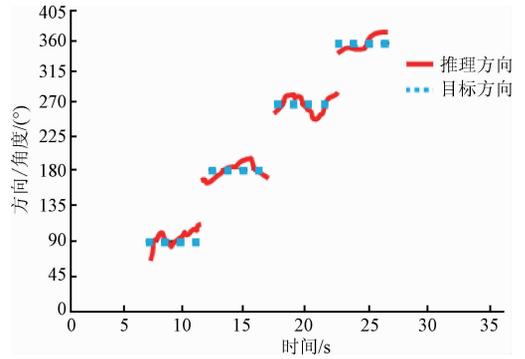


图 16 正方形路径方向意图
Fig. 16 Intention direction of target path

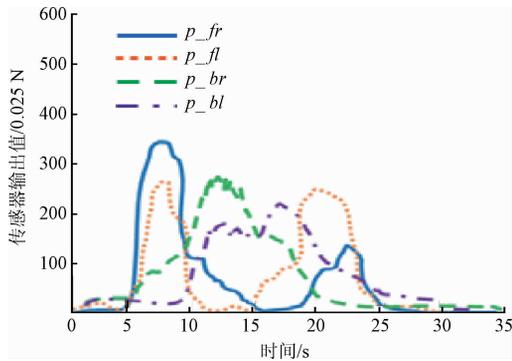


图 15 菱形路径传感器输出值
Fig. 15 Sensors' output of diamond path

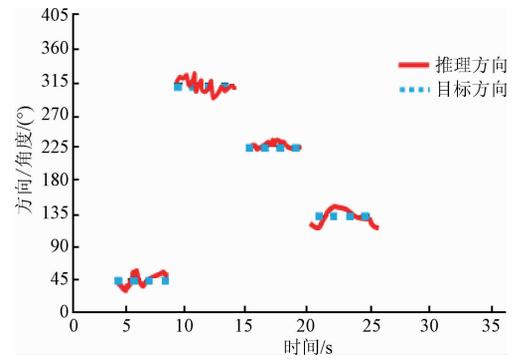


图 17 菱形路径方向意图
Fig. 17 Intention direction of diamond path

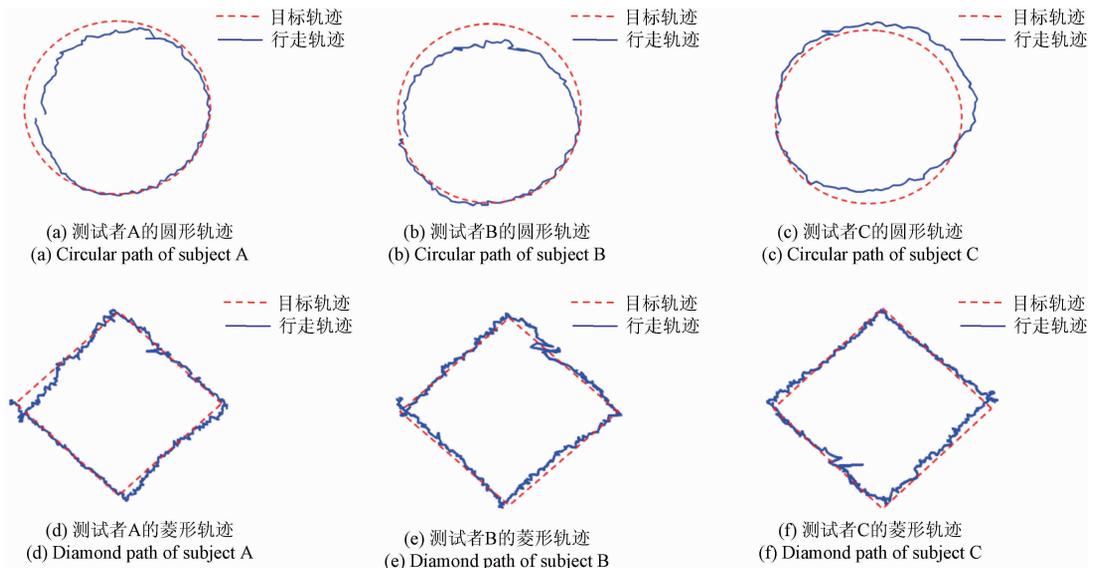


图 18 轨迹追踪实验
Fig. 18 Experiments of path tracking

4 结 论

本文提出了一种基于规则进化策略的双层混合型模糊推理步行方向意图识别方算法,该算法通过步行过程中的膝盖旋转角度识别出跌倒等异常行为并使能机器人采取紧急刹车等措施,从而确保了下肢功能障碍患者步行过程中的安全性。同时基于前臂压力与对应的方向意图建立了具有稀疏特性的知识库,采用距离型模糊推理算法实现对任意方向步行意图的准确识别。通过规则进化算法实时更新模糊规则库,减少了由于患者使用习惯,非稳定模糊规则带来的推理误差,提高系统的兼容性并采用知识半径理论提高系统识别精度。实验结果表明,本文采用的基于规则进化策略的双层混合型模糊推理算法可以确保下肢功能障碍患者在日常起居与康复训练的安全性前提下,有效地识别任意方向的步行意图。该步行方向意图识别方法可以被应用于医院、家庭等助老助残场所中。在患者操作全方向康复机器人在室内空间行走时,需要完成旋转,变速行走等动作,从而促进下肢核心肌肉群的康复效果。因此,在接下来的工作中,将会对患者操作全方向康复训练机器人的旋转意图估计与步行速度估计进行深入研究。

参考文献

- [1] ZHANG X, YUE Z, WANG J. Robotics in lower-limb rehabilitation after stroke [J]. Behavioural Neurology, 2017, 2017 (4):1-13.
- [2] 胡进,侯增广,陈翼雄,等. 下肢康复机器人机器及其交互控制方法[J]. 自动化学报, 2014, 40(11): 2377-2390.
HU J, HOU Z G, CHEN Y X, et al. Lower limb rehabilitation robots and interactive control methods[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(11):2377-2390.
- [3] RIMAN C F, PERALTA H, MONACELLI E, et al. A multi-interface platform system for assistance and evaluation of disabled people, applied bionics and biomechanics[J]. Applied Bionics & Biomechanics, 2011, 8(1):55-66.
- [4] 何侃,田亚清,李强,等. 基于LD3320的语音识别智能垃圾桶设计[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(6): 85-88.
HE K, TIAN Y Q, LI Q, et al. Design of speech-recognition intelligent trash based on LD3320 [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(6): 85-88.
- [5] 杨金霄,沈天飞,滕秋霞,等. 基于声门激励的语音、音量调整方法[J]. 电子测量技术, 2016, 39(2): 72-75.
YANG J X, SHEN T F, TENG Q X, et al. Speech rate and volume modification method based on glottal pulses[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(2):72-75.
- [6] GOPURA R A R C, BANDARA D S V, GUNASEKAR J M P, et al. Recent trends in EMG-based control methods for assistive robots[J]. Electrodiagnosis in New Frontiers of Clinical Research, 2013:237-268.
- [7] UEDA J, MING D, KRISHNAMOORTHY M, et al. Individual muscle control using an exoskeleton robot for muscle function testing[J]. IEEE Transactions on Neural System & Rehabilitation Engineering, 2010, 18(4): 339-350.
- [8] ARTEMIADIS P K, KYRIAKOPOULOS K J. An EMG-based robot control scheme robust to time-varying EMG signal features [J]. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 2010, 14(3):582-588.
- [9] SONG AI G, ZENG H, YANG R H, et al. Fundamental problems in rehabilitation robots based on neuro-machine interaction[J]. Instrumentation, 2014, 1(3):1-16.
- [10] SHEN B, WANG S Y, WANG Y N. User's moving Intention Identification for human support robot [C]. International Symposium on Soft Computing & Intelligent Systems, 2014:1073-1077.
- [11] WANG Y N, WANG S Y. Identification of directional intention for wheelchair robot using a distance fuzzy reasoning method [C]. International Conference on Advanced Mechatronic Systems, 2014:260-263.
- [12] TANG Y, YANG X. Symmetric implicational method of fuzzy reasoning[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2015, 54(8):1034-1048.
- [13] 白中浩,焦英豪,白芳华. 基于主动形状模型及模糊推理的驾驶疲劳检测[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(4):768-775.
BAI ZH H, JIAO Y H, BAI F H. Driving fatigue detection based on active shape model and fuzzy inference[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(4): 768-775.
- [14] 王跃飞,王华瑞,胡昊,等. 基于双层模糊控制的汽车能量管理系统研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(12):1790-1797.
WANG Y F, WANG H R, HU H, et al. Research of

energy management system in vehicle based on double fuzzy control[J]. Journal of Electronic Measurement And Instrumentation, 2015, 29(12):1790-1797.

- [15] SOYGUDER S, ALLI H. Fuzzy adaptive control for the actuators position control and modeling of an expert system[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(3):2072-2080.
- [16] WANG S Y. Distance-type fuzzy reasoning method[J]. Journal of Japan Society for Fuzzy Theory and Intelligent Informatics, 2008, 20(3):335.
- [17] SHANG T, WANG S Y. Knowledge radius: A selective knowledge use strategy for distance-type fuzzy reasoning method[J]. ICIC Express Letters, 2009, 3(3):331-336.
- [18] 尚涛, 吴威, 刘建伟. 基于拟人化推理策略的行为模仿[J]. 电子学报, 2010, 38(2):83-88.
SHANG T, WEI W, LIU J W. Behavior imitation based on humanoid reasoning strategy [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(2):83-88.

作者简介



赵东辉, 2016 年于沈阳工业大学获得硕士学位, 现为沈阳工业大学博士研究生, 主要研究方向为康复机器人。

E-mail: putongdeyu@126.com

Zhao Donghui received his M. Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2016. Now he is a Ph. D. candidate in Shenyang University of Technology. His main research interest is rehabilitation robot.



杨俊友(通讯作者), 1993 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为沈阳工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为康复机器人与特种电机及其控制等。

E-mail: junyouyang@sut.edu.cn

Yang Junyou (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Shenyang University of Technology in 1993. Now he is a professor and Ph. D. supervisor in Shenyang University of Technology. His main research interests include rehabilitation robot, special motor and control etc.