

智能假腿膝关节的控制方法研究及发展趋势

李 璿¹ 喻洪流¹ 曹武警¹ 王振平¹ 赵伟亮¹

下肢假肢是下肢截肢患者用于支撑体重、代偿运动功能、恢复日常生活和工作的特殊器具^[1]。1986年中川昭夫等提出了基于微处理器的控制气动式摆动相的膝关节,并公开了这个技术。1990年英国布莱切福特公司获得了此项技术的许可,研制出来世界上第一款智能假肢:IP,这种膝关节使用了微处理器芯片以及传感器对步行进行控制^[2]。最初关节内置微处理器能控制步行周期中的支撑相或者摆动相关节阻尼,之后随着研发的进行,膝关节更加的智能,截肢者能以任意步速行走,并完成上下楼、走斜坡、骑自行车等动作^[3]。上海理工大学喻洪流教授等^[4]设计了基于小脑模型神经网络控制器的智能膝上假肢。中南大学的谭冠政教授等^[5]设计了智能仿生人工 CIP-I Leg,一种基于非线性 PID 控制的人工腿位置伺服控制系统,利用霍尔传感器判断步速调节电机轴来调节阀门位置达到调节气缸阻尼来适应步速改变。现代智能控制膝关节主要是通过多传感器数据采集和智能控制方法相结合,根据不同的环境,来调节控制膝关节,使人达到最佳的步态。

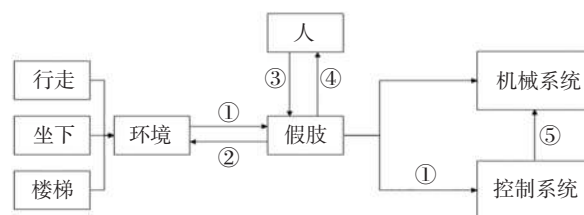
1 智能假肢的特点

目前关于智能假肢国内外还没有一个统一的定义,智能假肢一般认为是采用微电脑控制的、可以对膝上假肢进行摆动相速度对称性自动调节且(或)可以对站立相的稳定性进行自动控制的膝关节^[5]。关于智能假肢的分类有很多种,美国的 Martin Grimmer 和 André Seyfarth(2015年)^[6]在他们的书中将智能假肢按输入的信号分类,分为:有限状态机控制、肌电控制、相平面控制、基于健康肢体/残肢的控制、神经网络控制这五类。人腿生物力学的关键特性——膝关节的自适应特性,这也是控制部分最为关键的一部。智能假肢控制的最终效果就是达到步态跟随,可以随着环境和人为的改变而学习适应,从而达到和正常人一样的步态。

2 智能假肢的控制方法

现代智能假肢的控制模型通常是人—假肢—环境相结合的模型,如图1。常用的控制方法主要有基于有限状态机

图1 现代智能假肢控制模型



①传感器信息;②适应;③大腿残端;④阻尼;⑤控制信号。

的专家控制、模糊控制、神经网络控制,而在这三种控制方法中,专家控制是最容易实现的,模糊控制和神经网络控制则是要和其他控制方法综合使用才能得到良好的效果,下面对这三种方法分别进行了介绍。

2.1 基于有限状态机的专家控制

有限状态机是表示有限个状态以及这些状态之间的转移和动作的数学模型,每个状态表示一个方面的系统行为,有限状态机根据系统输入和当前系统的状态来决定是否转换输出状态。美国的 Geyer.H(2013)^[7]提出了一种通过测控腿部肌肉的肌力来控制行走的专家控制,对采集到的肌力信号进行分级处理,通过不同等级的肌力信号来调节膝关节不同的阻尼,这种控制采用了当前比较流行的肌力信号控制,但是肌力信号的强弱对于控制也有一定的影响。Bulea TC 等人(2013年)^[8]提出了 VIKM 控制,主要是按阻尼的变化范围来分解事件,从而调节行走的步态,这种按照不同阻尼划分的方法对于上下楼梯这种特定状态下的行走能够有效地控制,但是对于跌倒、跑步不能够有效地控制。2014年北京大学智能控制研究所提出一种有限状态机模型^[9],虽然也是将行走分为摆动、站立两个状态来控制,但是它是采集每种状态下所对应的控制器的数据来控制,这种方法是在传统有限状态机的控制上进行的改进,控制精度不是很高,有一定的局限性。2006年德国 OttoBock 公司研发了 C-Leg 智能仿生假腿,利用膝角度传感器和踝关节力矩传感器判断假肢摆动的速度和位置,调节液压缸阻尼变化保证行走过程中的稳定和安全^[10-12]。

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2017.08.024

1 上海理工大学康复工程与技术研究所,上海,200082

作者简介:李璿,男,在读硕士研究生;收稿日期:2016-04-12

有限状态机的控制方法是利用人体正常行走时重复运动的特性,对步态的典型状态进行规划,根据假肢上传感器检测出的信息来对应的不同事件,根据控制模式数据库制定的规则进行动作输出。很多不同种类的下肢假肢都用到了基于有限状态机的专家控制,这种控制方法易于实现,但需要繁杂的训练来获得控制的目标参数。

2.2 模糊控制

在日常生活中,渗透着许多的模糊概念,如大、小、冷、热等都没有明确的界限,模糊控制就是基于此类问题提出的一种控制方法,它是操作者根据自己的经验设计出能模仿人工智能的模糊控制器进行的控制,具有很强的稳定性和鲁棒性^[13-15]。近些年来模糊控制在假肢上取得很大的发展,国内提出了一种基于多传感器融合入的模糊控制方法^[16],主要是使用了5个传感器来采集信号通过模糊控制的方法来处理,能够达到连续处理,这种多传感器控制方法具有很好的研究前景,目前还处在实验室阶段,控制流程图见图2。Slavka Viteckova^[17]提出了一种零状态模型(ZMP)的模糊控制方法,该方法主要是通过传感器采集的数据来确定人的步态信息,对于研究步态的对称性和周期性有很好的帮助,这种模糊控制的方法也有很大的局限性,通过传感器采集的信息进行处理,处理的效率不高。Kuldeep Singh^[18-19]在2011年提出了一种基于肌电信号的模糊控制方法,主要是将采集到的肌电信号的频率作为模糊控制器的输入,来调节控制,这种控制方法目前还处于实验室数据分析阶段,对于数据的分析有很大的帮助。

模糊控制通常是和PID控制、自适应控制、最优控制等传统控制方法结合在一起使用,发挥各自优点,德林公司的Auto-Pilot膝关节是应用模糊控制的典型产品^[19-20]。但是模糊控制的快速性和准确性有待提高。

2.3 神经网络控制

基于神经网络的控制称为神经网络控制(neural network controller, NNC),神经网络控制基本不依赖模型,它比较适合那些具有不确定性或高度非线性的控制对象。Jutamart和Warakorn(2012年)^[21]针对上/下楼问题建立了一个神经网络模型,可以根据阶梯高度的不同进行学习调整,这种

模型主要是针对楼梯的步态研究,能够预测上楼时的膝关节的角度,实现平稳上楼。Favieiro GW等(2011年)^[22]提出一种RBF的自适应神经网络膝关节控制,通过肌电信号来控制腿部摆动,达到最佳的行走姿态,整个系统也结合了模糊控制器,这种控制方法目前还处于实验室数据研究阶段,实用性不是太高。2009年Ossur公司研制出世界上第一款主动型人工智能假肢Power knee^[23],配备转矩和加速度感应器随时感应地面的状况,控制致动器行走。神经网络控制具有较强的适应和学习功能,因此神经网络用于膝关节控制系统是必然趋势,但是鉴于神经网络不能解释自己的推理过程和推理依据、数据不充分使神经网络无法进行工作等缺点,在膝关节的控制中,经常会用神经网络控制与其他智能控制方式相结合或者是基于传统控制理论的神经控制^[24]。

CMAC本质上是一种用于映射复杂非线性函数的查表技术,如图3。CMAC是基于局部学习的神经网络,它是把信息存储在局部结构上,使每次修正的权很少,在保证函数非线性逼近性能的前提下,学习速度很快,适合于实时控制^[25]。R. A. Limal和V. R. F. S. Marães(2015年)^[26]利用CMAC模型进行下肢的控制模拟仿真,验证了下肢小脑模型的稳定性。上海理工大学喻洪流教授等(2007年)设计了基于小脑模型神经网络控制器的智能膝上假肢模型,该模型完成了对假肢动力模型仿真。

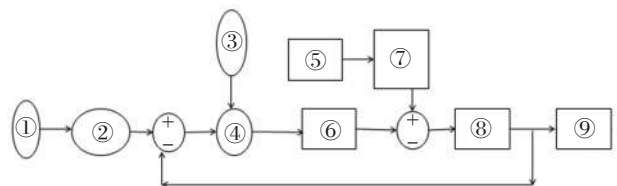
图3 CMAC网络的工作过程



3 展望

目前基于有限状态机控制的假肢运用比较多,主要是利用人体正常行走时重复运动的特性,通过对典型事件即步态的典型状态进行规划,每个状态下对应着一个动作和控制,这样比较容易实现控制,但是它的缺点也比较明显,人的行走过程是一个复杂的过程,有限状态机并不能完全包含。模糊控制和神经网络控制是最近兴起的控制方法,主要是结合其他的方法一起使用,如:PID、EMG、ZMP等,并不能单独的使用^[27]。智能假肢的控制是一个复杂的过程,所处的环境,行走的速度,还有许多外在的影响都会干扰到行走的姿势。为了使患者行走更加贴近正常人,达到步态跟随的效果,现在的智能假肢都是许多的智能控制算法相互结合使用,如ZMP、SEMG、MVC、CIC等。智能假肢控制的关键在于对于膝关节的控制,膝关节的阻尼变化是一个复杂的非线性的曲线,还会受到许多外部的干扰,有很多种行走情况,所以以后

图2 模糊控制图



①加速度;②速度矢量;③传感器;④姿态;⑤陀螺仪;⑥转换错误;⑦零补偿取消;⑧循环矩阵;⑨输出

具有学习能力、适应性比较强的控制算法是研究发展方向。

参考文献

- [1] 杨鹏,刘作军,耿艳利,等.智能下肢假肢关键技术研究进展[J].河北工业大学学报,2013,(1):76—80.
- [2] 喻洪流.假肢矫形器原理与应用[M].南京:东南大学出版社,2011.104—105.
- [3] 刘爱峰,马剑雄,魏强,等.膝关节生物力学模型研究进展[J].中国矫形外科杂志,2012,20(19):1774—1776.
- [4] 喻洪流,钱省三,沈凌,等.基于小脑模型神经网络控制的步速跟随智能膝上假肢[J].中国组织工程研究与临床康复,2007,11(31):6233—6235.
- [5] 王振平,喻洪流,杜妍辰,等.假肢智能膝关节的研究现状和发展趋势[J].生物医学工程学进展,2015,(3):159—163.
- [6] Martin Grimmer, André Seyfarth. Mimicking human-like leg function in prosthetic limbs[M]. Springer Netherlands, 2014, 2: 105—155.
- [7] Ruta Desai, Hartmut Geyer. Muscle-reflex control of robust swing leg placement[C]. 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2169—2174.
- [8] Bulea TC, Kobetic R, Audu ML, et al. Finite state control of a variable impedance hybrid neuro prosthesis for locomotion after paralysis[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2013, 21(1):141—151.
- [9] Wang Qining, Yuan Kebin, Zhu Jinying, et al. Finite-state control of a robotic transtibial prosthesis with motor-driven non-linear damping behaviors for level ground walking[J]. IEEE, 2014:63—89.
- [10] D.Zlatnik, B.Steiner, G.Schweitzer. Finite- State control of a trans-femoral (TF) prosthesis[J]. IEEE Journals & Magazines, 2002:34—73.
- [11] Au SK, Bonato P, Herr H. An EMG-position controlled system for an active ankle-foot prosthesis: an initial experimental study[C]. International Conference on Rehabilitation Robotics. IEEE, 2005:375—379.
- [12] Varol HA, Sup F, Goldfarb M. Multiclass real-time intent recognition of a powered lower limb prosthesis[J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2010, 57(3):542—551.
- [13] Slavka Viteckova, Patrik Kutilek, Jan Kauler, Zdenek Svoboda. Fuzzy expert system for determining the human gait phase [C]. IEEE, 2014:56—83.
- [14] Kuldeep Singh, Hardeep S. Ryait, Richa Bhatia. Precise and accurate multifunctional prosthesis control based on fuzzy logic techniques[C]. 2011 International Conference on Communication Systems and Network Technologies 2011:55—83.
- [15] Danúbia Soares Pires, Ginalber Luiz de Oliveira Serra. A new methodology for model based robust fuzzy digital PID controller design[C]. 2012 Third Global Congress on Intelligent Systems, 2012: 264—267.
- [16] Kebin Yuan, Shiqi Sun, Zikang Wang, et al. A fuzzy logic based terrain identification approach to prosthesis control using multi-sensor fusion[C]. 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2013:2867—2875.
- [17] Slavka Viteckova, Patrik Kutilek, Jan Kauler, et al. Fuzzy expert system for determining the human gait phase[C]. IEEE 2014 International Conference on Applied Electronics, 2014: 1—6.
- [18] Alzaydi AA, Cheung A, Joshi N, et al. Active prosthetic knee fuzzy logic-PID motion control, sensors and test platform design[J]. IJSRE, 2011, 2(12): 1—17.
- [19] Kuldeep Singh, Hardeep S. Ryait, Richa Bhatia. Precise and Accurate multifunctional prosthesis control based on fuzzy logic techniques[C]. 2011 International Conference on Communication Systems and Network Technologies, 2011:188—193.
- [20] Frank Sup, Hüseyin Atakan Varol, Michael Goldfarb. Upslope walking with a powered knee and ankle prosthesis: initial results with an amputee subject[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2011, 19(1): 71—78.
- [21] J Pinitlertsakun, W Charoensuk. Knee angle prediction during stair ascending gait of trans-femoral amputee neural networks application[C]. Biomedical Engineering International Conference, 2012:1—5.
- [22] Favieiro GW, Balbinot A. Adaptive neuro-fuzzy logic analysis based on myoelectric signals for multifunction prosthesis control[J]. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc, 2011 (2011):35—68.
- [23] Cheron G, Leurs F, Bengoetxea A, et al. A dynamic recurrent neural network for multiple muscles electromyographic mapping to elevation angles of the lower limb in human locomotion[J]. J Neurosci Methods, 2003, 129(2):95—104.
- [24] Huang H, Zhang F, Hargrove LJ, et al. Continuous locomotion-mode identification for prosthetic legs based on neuromuscular-mechanical fusion[J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2011, 58(10):2867—2875.
- [25] Zhang F, Liu M, Huang H. Effects of locomotion mode recognition errors on volitional control of powered above-knee prostheses[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2015, 23(1):64—72.
- [26] Lima RA, Marães I, VRFS, Martins JP, et al. Human knee simulation using CMAC ANN[C]. IEEE T NEUR SYS REH, 2015:202—300.
- [27] Ochoa-Díaz C, Rocha T S, de Levy Oliveira L, et al. An above-knee prosthesis with magnetorheological variable-damping[C]. 5th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics, 2014: 108—113.