

• 论 著 •

基于假肢步态仿真模拟与评测系统的步态对称性研究



喻贝贝^{1,2,3}, 喻洪流^{1,3}, 孟青云^{2,3}, 孟巧玲^{1,3}, 曹武警^{1,3}

1. 上海理工大学 康复工程与技术研究所(上海 200093)
2. 上海健康医学院(上海 201318)
3. 上海康复器械工程技术研究中心(上海 200093)

【摘要】 提出并设计一种用于下肢智能假肢的步态仿真模拟与评测系统的软硬件平台,从而可通过机器测试代替人体穿戴测试,定量分析智能膝关节假肢的穿戴对称性效果。通过全身三维步态与运动分析系统仪器采集成年人的关节角度和步幅等步态数据,提取模拟步态特征曲线,通过相应关节拟合步态曲线实验,验证测试平台的可行性,然后将所研发智能膝关节假肢穿戴在假肢测评系统上,定量分析步态对称效果。结果表明所研发智能膝关节不同速度下的步态对称性无明显差异,均可超过 88%,假肢步态仿真模拟与评测对下肢智能假肢的功能模拟和评测具有良好的效果。

【关键词】 智能膝关节;假肢;步态模拟与评测;对称性;机器测试

Study on gait symmetry based on simulation and evaluation system of prosthesis gait

YU Beibei^{1,2,3}, YU Hongliu^{1,3}, MENG Qingyun^{2,3}, MENG Qiaoling^{1,3}, CAO Wujing^{1,3}

1. Institute of Biomechanics and Rehabilitation Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, P.R.China
 2. Shanghai University of Medicine & Health Science, Shanghai 201318, P.R.China
 3. Shanghai Engineering Research Center of Assistive Devices, Shanghai 200093, P.R.China
- Corresponding author: MENG Qingyun, Email: mengqy1996@126.com

【Abstract】 A software and hardware platform for gait simulation and system evaluation for lower limb intelligent prosthesis is proposed and designed, in order that the wearable symmetry effect of the intelligent knee prosthesis can be quantitatively analyzed by machine test instead of human wear test. The whole-body three-dimensional gait and motion analysis system instrument, a device to collect gait data such as joint angle and stride of adults, was used for extracting simulated gait characteristic curve. Then, the gait curve was fitted based on the corresponding joint to verify the feasibility of the test platform in the experiment. Finally, the developed artificial knee prosthesis was worn on the prosthetic evaluation system to quantitatively analyze the gait symmetry effect. The results showed that there was no significant difference in gait symmetry between the developed knee joints at different speeds, which could reach more than 88%. The simulation and evaluation of the prosthetic gait have good effects on the functional simulation and evaluation of the lower limb intelligent prosthesis.

【Key words】 intelligent knee joint; artificial limbs; gait simulation and evaluation; symmetry; the machine test

引言

智能假肢研发过程中,为了测试假肢性能的好坏,需要残疾志愿者配合做大量的测试实验。国外学者对此报道过很多相关的研究。例如, Ko 等^[1]通

过测试三名成年男性截肢患者足踝关节的能量存储和恢复情况,判定他们穿戴不同假肢踝关节的生物力学特征。类似地, Raschke 等^[2]通过记录 11 例创伤性截肢患者七天时间内穿戴假肢的磨损程度,分析不同假肢的生物力学特性,评估相应假肢的性

DOI: 10.7507/1001-5515.201811038

基金项目:国家重点研发计划项目课题(No.2018YFB1307303);国家自然科学基金项目(No.61473193);上海康复器械工程技术研究中心资助项目(No.15DZ2251700)

通信作者:孟青云, Email: mengqy1996@126.com



<http://www.biomedeng.cn>

能,以达到截肢患者选择更好假肢的目的。另外, Arifin 等^[3]通过测试 10 名膝下截肢患者的假肢穿戴情况,依据能有效反映患者姿势稳定性的平衡量表来评判他们穿戴不同假肢时的康复效果。

上述测试需要使用摄像机、测力平台和其他方法收集动力学和运动学数据,因此获取数据十分困难。而且人体步态的动态变化使得受试者之间缺乏可重复性,因而测试结果往往是有限的^[4-5]。另外,考虑到跌倒或者绊倒存在责任和安全问题,因此在测试过程中通常需要添加安全预措施。毋庸置疑,上述人体测试耗时长、重复性差、操作繁琐且存在责任风险,给患者带来极大的不适的同时,也影响了假肢的研发进度^[6-7],因此这些问题亟待解决。

以假肢测试平台(机器测试)代替人体测试实验或可有效避免上述测试耗时、重复性差等难题,对此国内外学者已经进行了大量研究。例如, Yunardi 等^[8]通过相机捕捉一个腿部摆动的步态周期中腿部各关节的角度,已达到准确获取腿部数据的效果。显然,这种测试方式复杂且硬件成本较高,很难得到推广和应用。另外,焦伟^[9]在控制系统中制定模糊控制规则,实现了机器测试代替人体进行连续步行的效果。但是,他们的机器测试平台只具有患侧腿部的结构设计,故无法对健侧腿和残侧腿的步态对称性进行研究。同样地, Richter 等^[10]

通过动态建模使得假肢测试机器人在矢状面可以完成两个自由度的髌关节运动,但是其只能模拟单侧髌关节运动,无法进行对称性分析。综上所述,目前尚未建成一套成熟的下肢假体性能评价体系。因此,本工作拟提出一种可以模拟健侧与患侧双下肢功能的行走测试平台。

1 步态仿真模拟与评测系统设计

下肢假肢模拟与评测系统是为测评智能膝关节性能而设计,用以评测系统两侧下肢的结构不同。其中,一侧为人工下肢,由人工髌关节和人工膝关节组成,用来模拟残疾患者的健康侧腿;另一侧为仿生下肢,由人工髌关节、智能膝关节组成,用来模拟残疾患者的患侧肢体。行走不仅仅是下肢在运动,而且身体的重心会周期性地左右震荡,所以需要对其行走过程中的平衡问题进行控制^[11-12],本工作采用气缸驱动髌关节升降来模拟人体的重心变化,通过设定跑步机的速度模拟人体不同速度下的行走过程。智能下肢假体通过一个特殊的关节连接到测试系统仿生下肢侧模拟器上,实现功能模拟。整个系统的设计基于仿生学原理,将人行走过程简化为髌关节和膝关节在二维平面内实现一个自由度的运动。其样机设计原理图如图 1 所示。

下肢假肢步态仿真模拟与评测系统包括三个

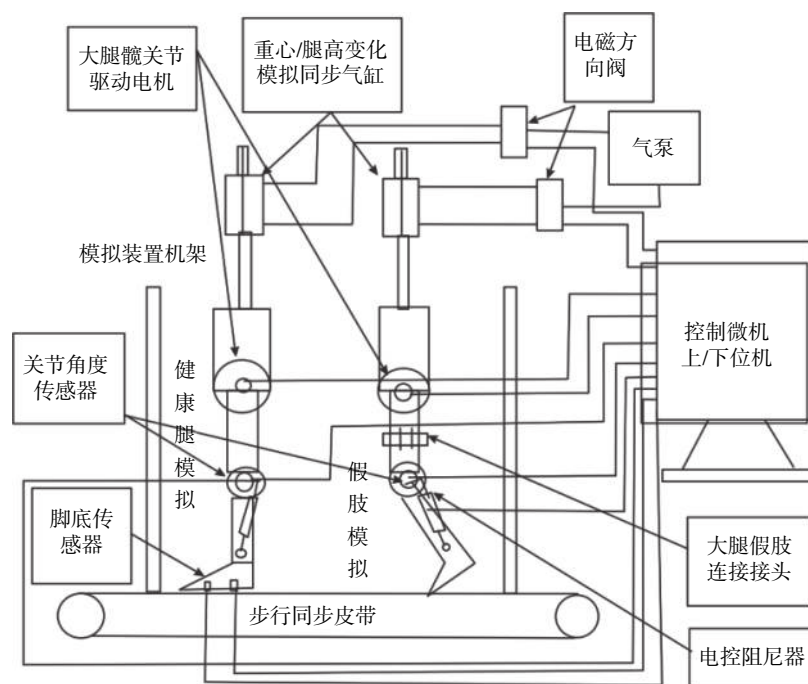


图 1 步态仿真模拟与评测系统结构原理图

Fig.1 Schematic diagram of gait simulation and evaluation system

步进电机，分别驱动人工下肢侧髋关节和膝关节以及仿生下肢侧髋关节，并通过气缸升降模拟正常人行走过程中重心的变化，使整个系统可以在二维平面上完成步态仿真。本工作使用 86BYGH250C 的两相混合式步进电机配合上海研蓝自动化科技有限公司生产的 C5-E 驱动器来驱动相应关节的摆动。步进电机的基本步距角 1.8°，由于人体步态周期中支撑前期膝关节会有较小角度的屈伸动作，此时关节运动角度较小^[13]，故需减小每脉冲运转的角度来提高电机的运转精度。本设计通过驱动器将电机设置为 16 细分，使得电机可以低速平稳运行，通过安装在电机上的编码器实时检测髋关节和膝关节在行走过程中角速度和加速度的变化。控制系统的主控芯片采用 STM32F407VGT6，实时测量模拟行走步态过程的角度时间数据，下位机通过串口将数据传至上位机，在上位机中以文本的形式记录步态数据，方便后期数据处理。整体控制框图如图 2 所示。

2 步态仿真模拟与步态对称性实验

步态仿真模拟与评测系统需采集正常成年人行走步态周期的关节角度与时间数据作为控制源信号，配合驱动器形成闭环控制，分别去控制 3 个电机。本次步态数据采集实验受试者纳入标准为：①身体健康，没有影响运动的神经性疾病；②下肢以及足部各个关节能够正常活动，在没有辅助措施的情况下可以正常行走；③自愿参加实验。本次测试由专业医师用江苏德长医疗科技有限公司的全身三维步态与运动分析系统，采集一位 27 岁成年男性在跑步机上分别以 0.5、0.8、1.0 m/s 的速度行走的多个步态周期的关节角度与时间数据，其中一个步态周期指的是从一侧足跟着地到同侧腿足跟再次着地所经历的时间^[14]。数据采集过程中存在抖动等不确定性因素，因此对每种步速下采集的数据进行多个周期取平均值处理，选取其中一个较平滑的步态数据。最终在 Matlab 中拟合人体膝关节和髋关节步态曲线，如图 3 所示。

在图 3 中可以看到一个步态周期中每个时间点对应一个确定的角度，在程序中设置定时器的溢出时间，并将电机设置为同步模式，通过 CAN 总线依次发送各个关节的角度数据给相应的电机，通过电机驱动对应的关节，即可达到模拟人体行走步态的目的。

2.1 下肢假肢测试平台步态模拟验证测试

本实验的主要目的是研究假肢测评系统模拟

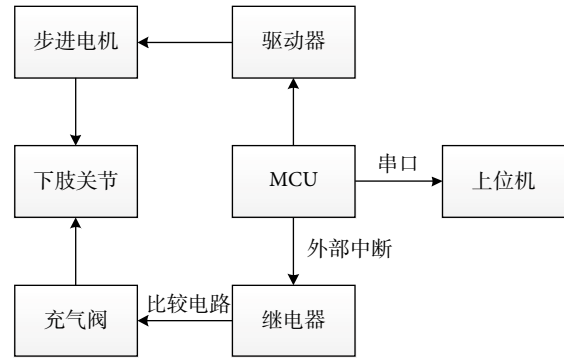


图 2 步态仿真模拟与测评系统整体控制框图

Fig.2 Control block diagram of gait simulation and evaluation system

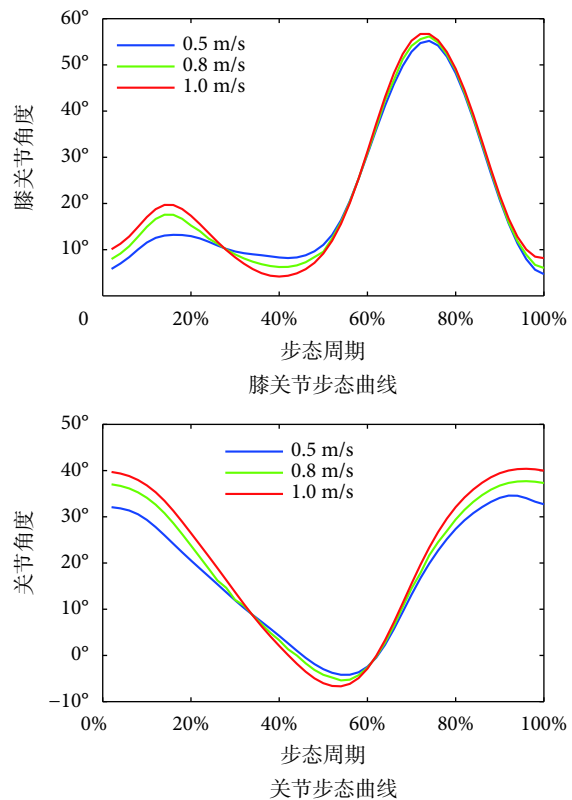


图 3 三种不同步速下的步态曲线

Fig.3 Gait curves of three different speeds

人体步态的近似程度。通过测评系统试验样机的左右髋关节与膝关节处的旋转编码器，采集模拟步态的输出关节角度数据，进而与通过仪器采集得到的关节角度数据进行比较。3 种步速下关节模拟程度相似，以人工下肢侧髋关节和膝关节为例，给出 0.5 m/s 步速下健侧髋关节与膝关节的目标曲线与实际采集所得的关节曲线，如图 4 所示。

从图 4 可以看出实际测试曲线与目标曲线基本重合，在一个周期的步态过程中，在幅值附近达不到输入的数据值，这是由于编码器的反馈延迟造成

的,这种误差在工程允许范围之内。实验结果表明,关节输入曲线与测试曲线的拟合度较高,说明下肢假肢测试平台可以较好地模拟人体步态。

2.2 智能膝关节假肢机器测试

文献[15]中根据左右侧对称性步态参数提出三个对称性指标,表达式如下:

$$SI = \frac{2(X_R - X_L)}{(X_R + X_L)} \times 100\% \quad (1)$$

$$R_I = \frac{X_R}{X_L} \times 100\% \quad (2)$$

$$R_{II} = \frac{(X_R - X_L)}{\max(X_R, X_L)} \times 100\% \quad (3)$$

式中 X_L 和 X_R 分别代表左右侧肢体的步态特征参数,本工作中, X_R 代表仿生下肢的步态实验数据, X_L 代表人工下肢步态实验数据。在式(1)中, $SI=0$ 时表示完全对称;式(2)中, $R_I=1$ 表示完全对称;式(3)中, $R_{II}=0$ 表示完全对称,其中正负号表示肢体的主导地位。基于测试平台的硬件设备,本文中步态特征参数为步幅和最小膝关节角度。

在2.1节评测系统步态模拟实验中已经验证了本系统模拟步态的可行性与准确性。本实验用已

经研发的智能膝关节假肢,通过特殊的接口穿戴在假肢测评系统的仿生下肢侧^[16]。将膝关节装载在测试平台仿生腿侧,启动测试平台,控制跑步机分别以0.5、0.8、1.0 m/s三种不同步速进行测试。通过智能膝关节控制系统搭载的角度传感器实时测量膝关节角度,并将相应的步态数据上传至上位机。通过观察不同步速下膝关节自动调整开度从而适应相应的步态的效果,评测膝关节的好坏。三种步速下,两侧膝关节的步态数据曲线如图5所示。结合上述步态对称准则,可计算步态周期以及步态特征参数如步幅、最小膝关节角度,步态对称量化结果如表1所示。

由图5可知,在不同步速下,装载所研发膝关节的步态曲线具有预屈曲过程,且对应曲线段较为平缓;表明装载所研发膝关节预屈曲角度小于正常步态。这是因为患者实际佩戴假肢膝关节时,义肢和截肢者的不同动作方式、认知能力和动态特性,以及两者之间的运动协调差异等,都会导致站立相预屈曲角度过小。另外,针对每一种步速下的步态曲线,人工下肢侧与仿生下肢侧的膝关节曲线整体变化趋势相同,两者相位上相差半个步态周期;并且仿生下肢侧的摆动相与人工下肢侧摆动相之间吻合得较好,而两者之间的站立相则吻合较差(站立相包含预屈曲过程)。针对三种不同步速下的步态曲线,人工下肢侧与仿生下肢侧的曲线并无太多变化。

根据表1可以得到以下结果。针对步幅的对称性指标,与0相比仿生下肢侧的 SI 和 R_{II} 偏差略大于人工下肢(1.07%~2.03%)。另外,不同步速下两侧步幅的 SI 和 R_{II} 偏差小于2.03%;而 R_I 逼近1(1.02~1.07)。这些结果表明两侧步幅差异较小且均在正常范围内。针对最小膝关节角度,当步速为0.5 m/s时,对称性指标 SI 、 R_{II} 均大于0,表明与仿生下肢侧相比,人工下肢侧的最小膝关节角度偏差较大。而当步速大于0.8 m/s时, SI 、 R_{II} 均小于0,表明与人工下肢侧相比,仿生下肢侧的最小膝关节角度偏差较大。基于本文研究,随着步速的增大,人工下肢侧和仿生下肢侧的 SI 、 R_{II} 的绝对值在增大, R_I 越来越远离1,表明步速变大时,对称性变弱,这与现实情况是相符的。

综上所述,本工作所研发的步态测评系统可以较好地模拟残疾患者佩戴假肢膝关节时的状态,定量评价假肢的步态对称性。

3 讨论和结论

相对于东南大学焦伟^[9]提出的的只具有模拟腿

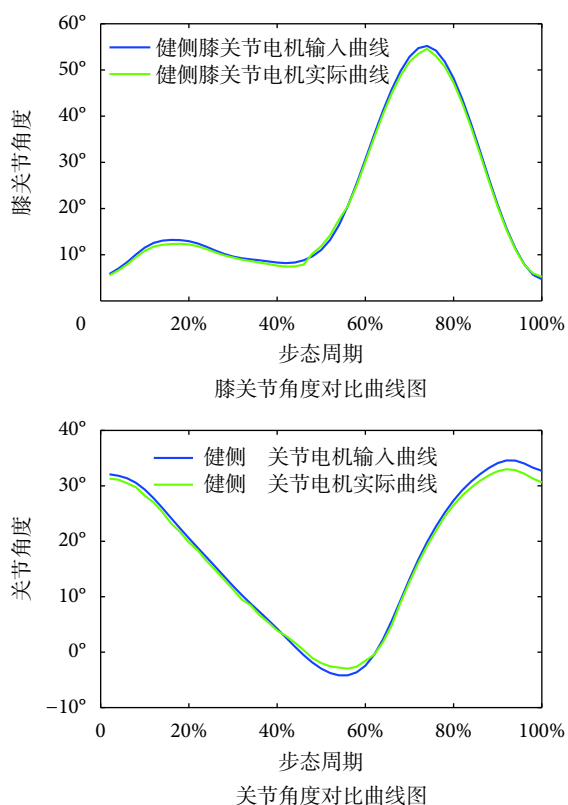


图4 0.5 m/s步速下输入与输出关节角度对比曲线图

Fig.4 Contrasting curves of input and output joint angles at 0.5 m/s pace

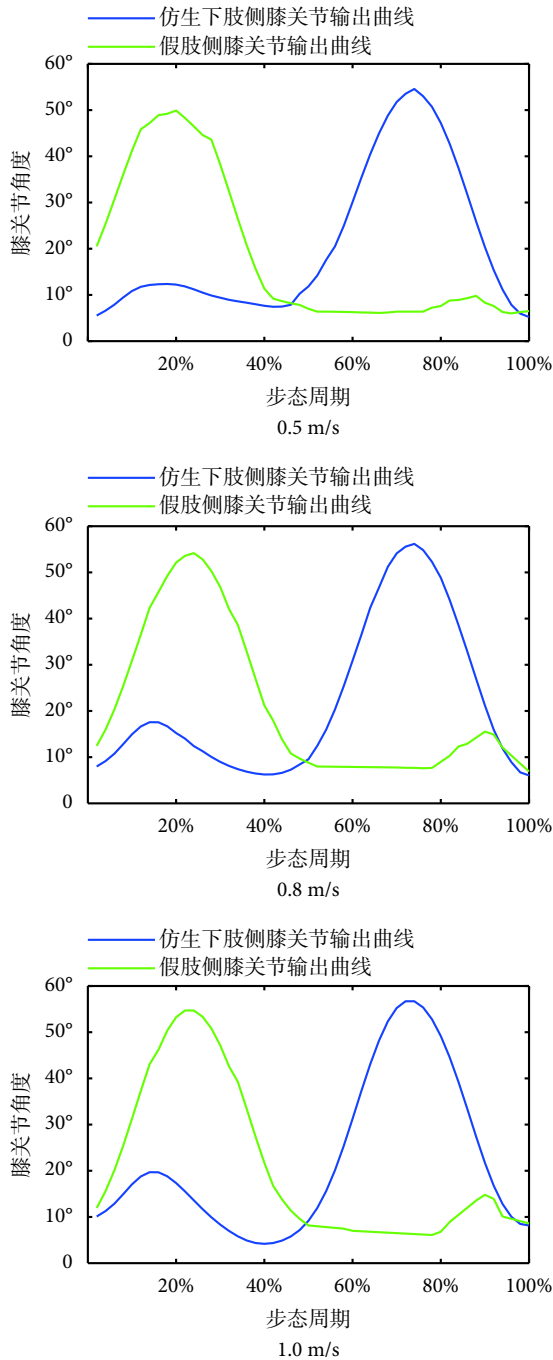


图5 三种不同步速下人工下肢侧膝关节与仿生下肢侧膝关节输出曲线图

Fig.5 Output curves of knee joint of artificial lower limb and bionic lower limb with three different speeds

结构的测试平台, 本文所提出的机器测试平台通过增设人工下肢, 与仿生下肢的步态数据进行对比, 可以更好地评价和测试膝关节的性能。相对于 Yunardi 等^[8]通过相机捕捉数据的方法, 本设计采用角度编码器获取各个关节角度, 大大节省了成本。相对于 Richter 等^[10]只能模拟单侧髋关节运动的测试平台, 本设计具有双侧髋关节的结构设计, 可以对健侧腿和残侧腿的步态进行对称性分析。

表 1 步态对称性分析量化表

Tab.1 Quantification table of gait symmetry

| 步速 | 步幅 | | | 最小膝关节角度 | | |
|---------|-------|----------------|-----------------|---------|----------------|-----------------|
| | SI | R _I | R _{II} | SI | R _I | R _{II} |
| 0.5 m/s | 1.08% | 1.02 | 1.07% | 1.71% | 102.10% | 1.85% |
| 0.8 m/s | 1.87% | 1.04 | 1.21% | -1.47% | 93.81% | -1.72% |
| 1.0 m/s | 2.03% | 1.07 | 1.88% | -2.23% | 88.26% | -1.82% |

本文根据步态采集仪器采集正常成年人的步态特征数据, 然后提取人体步态轨迹曲线, 通过电机带动假肢测评系统的关节运动。将通过采集测试系统得到的相应的关节角度曲线与通过仪器采集的步态曲线进行对比, 验证了测试平台的可行性。然后在假肢测评系统仿生侧腿上研制的智能膝关节, 通过上位机将采集的步态数据记录下来, 结合步态对称评估标准, 进行了定量的步态对称性分析。假肢测试平台可以很好地带动已经研发的膝关节进行步态测试, 通过分析测试采集所得的步态数据, 可以促进膝关节的研发。

本实验只是基于水平面的步态评测, 后续可以将不同的路况环境加入假肢步态测评系统, 从而可以更加完善地去测评假肢膝关节的性能, 更好地促进膝关节的研发。

利益冲突声明: 本文全体作者均声明不存在利益冲突。

参考文献

- 1 Ko C Y, Kim S B, Kim J K, et al. Biomechanical features of level walking by transtibial amputees wearing prosthetic feet with and without adaptive ankles. *J Mech Sci Technol*, 2016, 30(6): 2907-2914.
- 2 Raschke S U, Orendurff M S, Mattie J L, et al. Biomechanical characteristics, patient preference and activity level with different prosthetic feet: A randomized double blind trial with laboratory and community testing. *J Biomech*, 2015, 48(1): 146-152.
- 3 Arifin N, Abu Osman N A, Ali S, et al. Evaluation of postural steadiness in below-knee amputees when wearing different prosthetic feet during various sensory conditions using the Biodex® Stability System. *Proc Inst Mech Eng H*, 2015, 229(7): 491-498.
- 4 Graham L E, Datta D, Heller B, et al. A comparative study of conventional and energy-storing prosthetic feet in high-functioning transfemoral amputees. *Arch Phys Med Rehabil*, 2007, 88(6): 801-806.
- 5 Johansson J L, Sherrill D M, Riley P O, et al. A clinical comparison of variable-damping and mechanically passive prosthetic knee devices. *Am J Phys Med Rehabil*, 2005, 84(8): 563-575.
- 6 Yilmaz A, Orhanli T. A test platform design for testing knee prostheses// 2014 18th National Biomedical Engineering Meeting. Istanbul: IEEE, 2014: 1-4.
- 7 Maqbool H F, Husman M A, Awad M I, et al. A real-time gait event detection for lower limb prosthesis control and evaluation.

- [IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng](#), 2017, 25(9): 1500-1509.
- 8 Yunardi R T, Firdaus A A, Agustin E I. Implementation of motion capture system for trajectory planning of leg swing simulator// 2017 International Seminar on Sensors, Instrumentation, Measurement and Metrology. Surabaya: IEEE, 2017: 11-16.
 - 9 焦伟. 假肢膝关节测试平台模糊PID控制系统研究. 南京: 东南大学, 2015.
 - 10 Richter H, Simon D, Smith W A, *et al.* Dynamic modeling, parameter estimation and control of a leg prosthesis test robot. [Appl Math Model](#), 2015, 39(2): 559-573.
 - 11 Prakash C, Mishra U, Jain M, *et al.* Automated kinematic analysis using holistic based human gait motion for biomedical applications// 2018 8th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering. Noida: IEEE, 2018: 700-706.
 - 12 Sun Ningping, Sakai Y. New approaches to human gait simulation using motion sensors// 2017 31st IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops. Taipei: IEEE, 2017: 126-131.
 - 13 Park S E, Ho Y J, Moon Y, *et al.* Analysis of gait pattern during stair walk for improvement of gait training robot// 2017 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Seogwipo: IEEE, 2017: 1905-1908.
 - 14 Babae M, Li Linwei, Rigoll G. Gait recognition from incomplete gait cycle// The 25th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). Athens: IEEE, 2018: 768-772.
 - 15 Wang Fei, Kim K, Wen Shiguang, *et al.* Study of gait symmetry quantification and its application to intelligent prosthetic leg development// 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Karon Beach: IEEE, 2011: 1361-1366.
 - 16 曹武警, 魏小东, 赵伟亮, 等. 基于生理步态的智能膝关节结构设计及训练方法研究. 生物医学工程学杂志, 2018, 35(5): 75-81.
- 收稿日期: 2018-11-20 修回日期: 2019-06-30
本文编辑: 李蓓兰