



被动行走测试系统的建立与实验研究

祁峰*, 毕来业, 王天舒

清华大学航天航空学院, 北京 100084

*联系人, E-mail: qifeng04@tsinghua.org.cn

收稿日期: 2012-08-24; 接受日期: 2012-10-22

国家自然科学基金资助项目(批准号: 10872102)

摘要 本文针对平面直腿的被动行走模型, 建立了被动行走的测试系统. 主要测试的参数为两腿的摆动角速度、角度和足底接触的法向作用力, 利用陀螺仪和薄膜力传感器等实验设备可以实现这些参数的测量. 同时利用建立的实验系统, 可以对被动行走的动力学过程进行研究, 得到了被动行走过程中足与地面的接触过程.

关键词 被动行走, 测试系统, 光纤陀螺仪, 薄膜力传感器, 接触

PACS: 21.10.Jx, 46.90.+s, 46.15.-x

doi: 10.1360/132012-731

被动行走的模型最早出现于美国人 Fallis^[1]申请的只依赖重力行走下坡的玩具专利. 最早提出被动行走概念的人则是加拿大人 McGeer^[2–4], 他在 1990 年提出概念的同时, 对被动行走动力学特性进行了系统性的研究. 这样一种步态接近人类行走能耗很低的双足行走迅速引起很多科研人员的兴趣. 自 McGeer 起, 很多的研究者对于平面和三维的被动行走进行了仿真的研究. Garcia^[5], Goswami^[6], Wisse^[7–9]和 Coleman 等人^[10]对被动行走的理论研究都有着很重要的贡献. 从被动行走的理论创建至今, 科学家们对被动行走的理论研究从平面模型发展到三维模型, 从简单的倒立摆模型发展到包含上肢、引入控制的复杂模型.

在理论仿真研究的同时, 对于被动行走的实验样机研究是理解和应用被动行走很重要的方式.

McGeer 最初对于被动行走的研究也是基于成功的实验样机实现的. 被动行走最重要的实验研究成果是 2005 年 *Science* 上刊登的 Cornell, Delft 和 MIT 的被动行走研究成果^[11–13]. Cornell 的 Collins 等人^[14]在 Garcia 的工作基础上, 将模型扩展到三维, 并与荷兰 Delft 大学的 Wisse 等人合作制作了真实双足的三维被动行走机器人, 其上肢与对侧的下肢通过机构联动, 因此上肢的增加并没有使自由度增加, 仅仅用于维持行走中的平衡. 同时这一实验室的研究人员研制的新型半被动行走机器人样机 Cornell Ranger, 在连续不间断的行走记录上越走越远. 2011 年 5 月, Ranger 完成了连续不间断行走 65.24 km 的记录, 行走使用的时间是 30 小时 49 分, 消耗能量 493 Wh, 能量消耗率仅为 0.28. 同时, Delft 大学进行了一系列被动行走实验样机的研究, Mike, Max, Meta 和 Leo 均为

引用格式: 祁峰, 毕来业, 王天舒. 被动行走测试系统的建立与实验研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43: 557–563

Qi F, Bi L Y, Wang T S. The introduction of the passive walking testing system and experimental study (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2013, 43: 557–563, doi: 10.1360/132012-731

二维的行走机器人, Dense 和 Flame 则是三维行走机器人. 另外, MIT 的脑科学及认知实验室的 Tedrake 等人^[15,16]也进行了这方面的研究. 他们的研究模型从一种型似企鹅、仅靠重力能从斜坡走下的小玩具提炼而来. 在理论研究的基础上, 制造了一个具有学习功能、带驱动装置的双足行走机器人. 除国外对于被动行走研究的诸多成果以外, 国内关于被动行走的研究成果也有很多. 吉林大学^[17,18]、哈尔滨工业大学^[19]、北京航空航天大学^[20]和清华大学^[21-23]等都对被动行走做了一定工作.

从以上的工作成果中可以发现, 被动行走的理论研究涉及了多体动力学、非线性、控制等多方面的学科综合, 同时被动行走的实验样机研究也是很重要的研究手段. 至今为止, 关于被动行走中足地接触的研究工作很少, 本文介绍的相关工作就是在对含有弹性接触模型的被动行走仿真研究工作的基础上^[24], 对于被动行走的测试和实验系统进行设计与实现, 并在实验中得到被动行走中的动力学参数.

1 测试系统的建立

1.1 测试模型与参数的选择

本文介绍的被动行走样机如图 1 左所示, 模型的腿长约为 0.33 m, 足半径为 120 mm, 实验样机制造材料为铝, 其外腿和内腿总质量均约 1 kg. 模型的两条内侧腿与髋关节的轴固连, 两条外侧腿通过髋关节的铝板相连, 此样机为平面的直腿被动行走模型样机. 图 1 右所示的木板为被动行走的斜面, 其长为 2.4 m, 共两块, 可通过调节木板两端的高度差来控制斜面的倾角. 由于直腿的被动行走器行走在平面上会发生摆动腿与地面的干涉, 在行走的斜面上布置小木块可以消除这种干涉, 在不同的斜面倾角之下, 木块之间的距离可以适当进行调节.



图 1 (网络版彩图) 被动行走样机示意图

Figure 1 (Color online) Testing model of passive walking.

平面的直腿被动行走器的简化动力学模型如图 2 所示, 被动行走器可以在倾角较小的斜坡上依靠重力实现行走. 在行走的过程中, 两腿与竖直方向的夹角 θ_1 和 θ_2 是确定模型构型的重要参数. 同时根据前期工作得到的结论^[24], 在被动行走的足地碰撞以及支撑足滚动的过程中, 接触法向力 N 也是影响碰撞后状态的重要参数, 而接触的摩擦力对于被动行走的步态影响较小. 综合以上分析, 选择接触过程的法向力以及绝对惯性坐标系中的两腿摆角 θ_1 和 θ_2 作为实验测试指标.

1.2 测试仪器与系统的搭建

选定待测参数后, 需要对测试方案进行设计, 包括确定测试设备以及搭建测试系统. 传感器作为测量实验中的核心, 可将需要测量的物理量转变为电压或者计数脉冲等电信号. 在此测试系统中, 陀螺仪、倾角传感器、编码器和薄膜力传感器是应用到的几种重要传感器.

陀螺仪 根据所指相关文献中的若干研究结果, 可以将被动行走器腿的动力学过程分为摆动、碰撞和支撑三种不同的过程, 其角速度约在 $\pm 200^\circ/\text{s}$ 之间变化, 同时在碰撞的时间段内角速度变化迅速, 在数据采集过程中就要求采样频率较高. 小型光纤陀螺的量程可以达到 $\pm 300^\circ/\text{s}$, 动态范围上限为 1 kHz, 输出的是模拟电压信号, 满足此实验采集要求. 另外对于短时间内的测量, 其零点漂移带来的误差较小. 本方案中, 选用了 VG949P 系列光纤陀螺(图 3(a)), 同时为充分利用其动态范围, 实验数据采用 1 kHz 进行采样.

倾角传感器和编码器 倾角传感器(图 3(b))用于

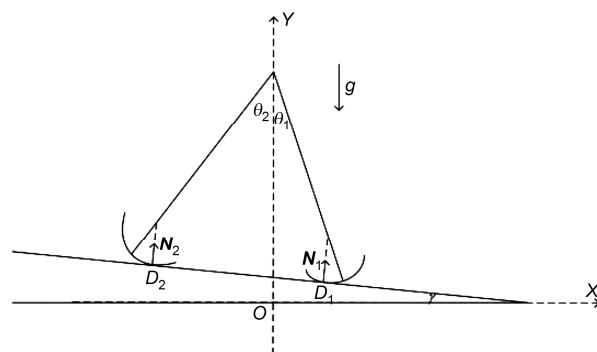


图 2 被动行走测试参数图

Figure 2 Testing parameters of passive walking.

准静态测量, 可以用来标定行走器腿姿态角的初值, 还可以用来测量斜坡的倾角. 编码器(图 3(c))用于角度测量.

薄膜力传感器 被动行走器足地碰撞的瞬间存在冲力, 冲击力的峰值与足地的接触特性相关, 在碰撞过程中可以达到数个 g 的加速度, 根据行走器自身重量约 2 kg , 要求传感器量程为数百牛. 同时在行走过程中, 传感器需要贴在足上, 要求具有一定的弯曲变形能力. 在本实验中选用了 FlexiForce A201 型薄膜接触力传感器(图 4), 其量程为 440 N , 时间常数为 $5\text{ }\mu\text{s}$, 满足要求, 可以贴在足底进行测量. 这类力传感器为阻抗变化型器件, 需要搭建运算放大电路, 将电阻变化变换为电压信号的变化, 进行数据采集.

其他实验设备 数据采集(DAQ)设备选用美国国家仪器公司的 NI USB-6212 型多用途 DAQ 设备. 对以上所有实验设备, 需要统一的电源在测量过程中进行供电. 同时数据采集过程需要通过虚拟仪器软件 NI LabView 2009 的程序, 对采集卡上不同类型的 IO 端口进行直接的读写操作, 并记录输出数据结果.

通过选定的实验设备, 进行相应的接线, 并对 LabView 进行编程实现数据的采集, 得到整个完整的实验系统如图 5 所示. 在此直腿的被动行走器内外腿各固连了一个光纤陀螺仪, 在外侧腿的足底布置了 10 片薄膜力传感器, 编码器可以用于光纤陀螺仪的验证工作, 倾角传感器用于标定每次实验的初始状态.

1.3 系统的验证

在完成实验测试系统的搭建工作之后, 需要对

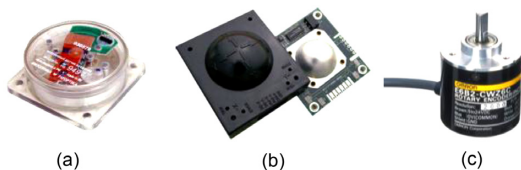


图 3 (网络版彩图)VG949P 光纤陀螺、倾角传感器、编码器示意图

Figure 3 (Color online) The gyros, the inclinometer and the encoder.

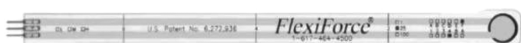


图 4 FlexiForce A201 型接触力传感器

Figure 4 The FlexiForce sensor.



图 5 (网络版彩图)实验系统

Figure 5 (Color online) The testing system.

部分传感器进行初始化标定及测试验证, 以保证测试结果的正确性.

1.3.1 力传感器的标定

根据使用手册的描述, FlexiForce A201 力传感器的变换特性与信号放大电路的特性有关, 且存在比较大的漂移与非线性度, 所以在使用时不对其输出的绝对数值精度和准确度有高的要求, 仅对其进行简易标定. 在标定时, 将行走器上力传感器的测点放置在突起物体上, 再放置在电子称上, 电子称的读数即为单个传感器上所受的正压力, 进行一定时间长度的测量, 再用采集到的电压值除以电子称读数, 即得到力传感器的灵敏度数值.

1.3.2 光纤陀螺仪的验证

陀螺仪作为一种绝对式惯性测量元件, 需要对其输出结果进行验证和校准. VG949 光纤陀螺的角速度-电压转换关系已在出厂报告中给出, 视为准确值. 但陀螺仪输出都存在漂移的现象, 由于地球自转的影响, 在输出信号中附加有一个偏移量, 这个量在出厂报告上只给出了大致数量级, 需要在实验中长期时间测量得到较精确的数值, 并在 LabView 测试程序中去除这一近似的直流分量.

光纤陀螺仪为测量角速度物理量的传感器, 编码器为测量角度物理量的传感器, 角速度是角度的微分, 可以通过二者的相互验证来实现对角速度测量的验证. 可以选择固定行走器的一条腿, 对另一条腿进行自由衰减摆动的测试, 得到的结果如所示图 6.

图 6 中光纤陀螺仪得到的角度值是根据陀螺仪输出的角速度值积分得到的. 可以看出二者吻合情况很好, 也就验证了光纤陀螺仪的正确性.

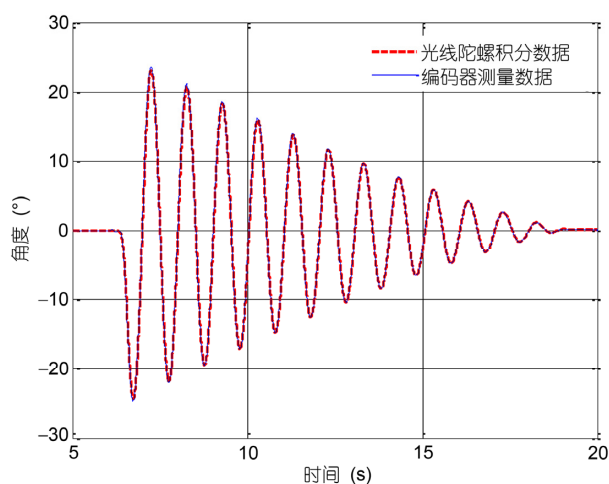


图 6 (网络版彩图)光线陀螺仪与编码器测得的自由衰减摆动角度曲线

Figure 6 (Color online) The validation of the gyros and the encoder.

2 实验结果

在斜面高度差 $\Delta h=14.2$ cm 的情况下, 斜面倾角 $\gamma \approx 0.06$ rad. 通过调整小木板的位置, 以及多次的释放可以得到较好的行走结果. 从固定于内外侧腿之上的陀螺仪可以得到行走时两腿的角速度数据, 根据初值进行角速度积分可以得到内外腿摆动角度值. 根据贴于外侧足底的十枚薄膜力传感器数据可对足地的法向接触力进行分析.

2.1 腿摆动角速度和角度实验测试结果

图 7 即为一次 8 步的行走过程中, 所测得两腿的角度和角速度变化曲线. 所得到的角度和角速度随时间变化的曲线与 Garcia^[5]对倒立摆模型研究的结果整体趋势相同, 但在碰撞阶段的角速度曲线有很大的不同. 从图 7 中角速度变化曲线中, 以内腿(图 7(b))的第一个周期为例, 可以发现, 在一个周期之内角速度在两个最小值的时刻发生两次剧烈的变化, 一次在 1 s 前, 一次在 1 s 后. 前一次的剧烈变化为内腿作为摆动腿与地面撞击的时刻, 后一次为外侧腿与地面发生撞击, 同时内侧腿从支撑腿转换为摆动腿的时刻. 在这两个角速度发生剧烈变化的时刻, 角速度的曲线都发生了一定程度抖动状态, 这与理想化的倒立摆模型中的角速度瞬时发生突变是有很大的区别的.

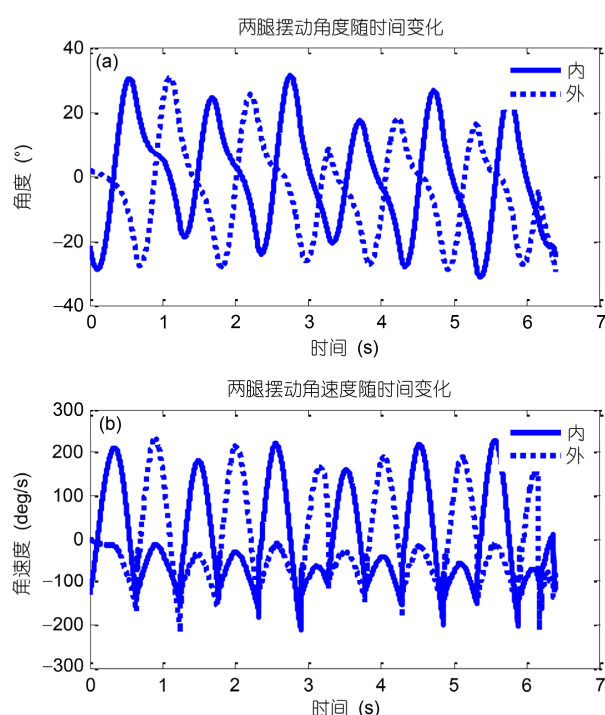


图 7 (网络版彩图)两腿角度和角速度随时间的变化曲线

Figure 7 (Color online) The testing data of angles and angular velocities of two legs.

2.2 足地接触法向力实验测试结果

在上例的行走过程中, 外侧足底布置的 10 片薄膜力传感器数据如图 8 所示. 外侧足上从行走方向的后方至前方顺序, 布置着第 01–10 号传感器, 也就是足在向前滚动过程中, 传感器接触的顺序从 01–10. 这里列出五个传感器的数值, 分别为第 02–06 号传感器. 第 01, 09 和 10 号传感器在行走过程中未与地面发生接触, 07 与 08 号传感器与 06 号形式相同, 限于篇幅就未将图全部列出. 从图 8 可知 02, 03 号传感器在 1 s 多, 2 s 多, 3 s 多时刻分别出现了较大的峰值, 04 号力传感器则出现了四个波状的峰值, 且峰值发生时间在 03 号峰值之后. 05 号传感器结果没有明显的特征, 06 号传感器的结果与 04 号类似.

将力传感器的曲线与外侧腿的角速度变化曲线进行比较, 如图 9 所示可以看出 02, 03 号传感器力峰值的时间段就出现于外侧腿与地面碰撞的时刻, 可以肯定此力的尖峰即为足底碰撞时刻的碰撞力峰值. 在外侧足与地面碰撞之后, 外侧腿由摆动腿变为支撑腿, 外侧足与地面发生滚动接触, 各个传感器按照

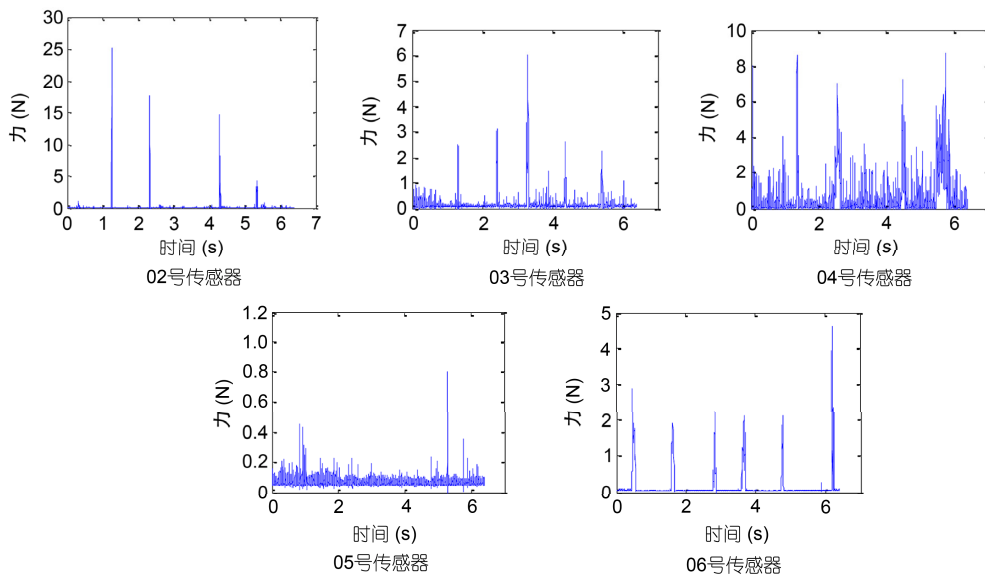


图 8 (网络版彩图)木板行走时薄膜力传感器的数据

Figure 8 (Color online) The testing data of the force sensor while walking on the boards.

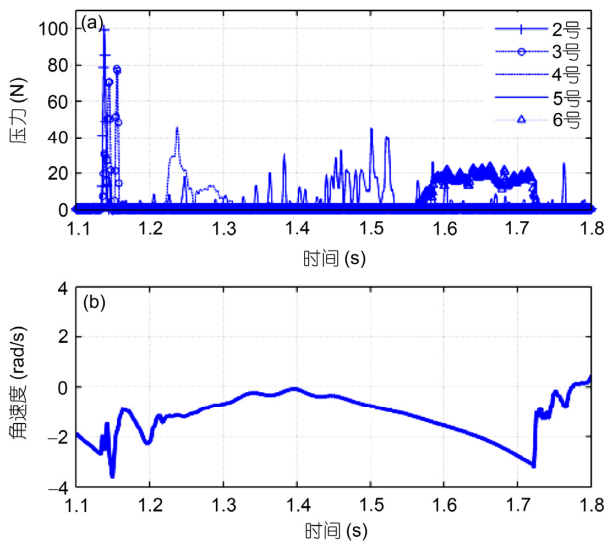


图 9 (网络版彩图)力传感器数据与外侧腿摆动角速度的对比图

Figure 9 (Color online) The data contrast of the force sensors and the angular velocity of outer leg.

接触的顺序与地面发生接触,即如图 9 中 03 号传感器峰值消失后的时间段。

图 9(a)中,力传感器的波峰值之间存在一定时间的“无响应区域”,这是由于力传感器具有一定的尺寸,无法进行连续的布置,当足与地面的接触位置为两片力传感器的中间位置时,力传感器就出现了各

个传感器波峰之间的“无响应区域”。通过对 01 号传感器的峰值放大中可以发现,其测量得到的峰值中,有 4–5 个采样点数据,说明了此峰值的发生并不是瞬间完成的。在 01 号传感器的峰值发生时间段内,02 号传感器也有一个较小的力峰值,意味着在足与地面发生碰撞的瞬间,01, 02 号传感器的位置均感受到了压力。根据两片传感器的大小,可说明足与地面发生的碰撞不仅仅是点碰撞。因此对于倒立摆似的被动行走仿真研究中,将碰撞的过程认为是一个点的接触是与实际情况存在很大差距的。同时,可以发现 03 号传感器的响应峰值不仅仅发生于 02 号传感器的峰值时刻,03 号传感器共发生 3 个峰值,在第一次的峰值之后又发生了两次力的数值上的震荡起伏。在力值下降的过程中,即为行走器与地面发生撞击之后的震动过程。如果震动幅度较大,就可以发生碰撞之后的弹起,甚至足与地面之间的滑动。法向接触力的峰值随着震荡逐渐减小,至 04 号传感器与地面接触的时间段时,力大小基本与重力作用于外侧足的分量相等。此后传感器记录的数据,即为足与地面纯滚动的法向接触力。

通过上述对于足地碰撞接触实验测试数据的分析,可以得到关于被动行走足地接触过程的总结。在摆动腿摆动至行走方向最大角度后,整个行走器的重心下降,同时摆动腿足底与地面的距离减小,直至

与地面发生碰撞. 对于斜面倾角 0.06 rad 时, 木板作为行走介质, 碰撞点发生在 02 号与 03 号传感器之间. 发生碰撞的初始时刻, 足与地面的碰撞力发生迅速的变化, 在几毫秒的时间段内就会增加至百牛的量级. 伴随着碰撞的发生, 摆动腿转换为支撑腿, 同时处于行走后方的支撑腿转换为摆动腿. 随后, 碰撞力峰值逐渐减小, 同时支撑腿向前滚动、摆动腿向前摆动. 如果对于刚度较大的足地接触介质, 如木板来说, 在发生第一次碰撞力的峰值之后, 碰撞力峰值可以逐渐减小至 0, 主要由于此时足在地面上产生了很小的弹起. 其间隙极其微小, 同时发生时间也非常短 (1 ms 左右). 接下来足与地面发生再次的碰撞, 接触力再次增大到峰值, 第二次的峰值小于第一次的峰值, 之后随着支撑腿的滚动再次减小. 这样的峰值可能发生若干次, 每一次峰值的大小也在逐步的减小, 足弹起的幅度也逐渐变小, 直至不再弹起. 几次峰值会在 0.1 s 内完成, 另外由于足弹起的发生, 足与地面

会发生很微小的相对滑动. 随碰撞力峰的减小至与物体重力相当, 碰撞过程完成. 接下来为支撑足与地面纯滚动过程, 摆动腿向前摆动, 直至再次循环至摆动腿的碰撞时刻.

3 结论与总结

本文介绍了在 McGeer 的平面直腿被动行走模型基础上, 所建立的被动行走研究的实验测试系统, 通过校核确认了参数的准确性. 并通过被动行走的实验, 得到了两腿的摆动角度、足与地面正向接触力随时间的变化曲线. 通过对实验结果的分析, 得到了被动行走足地接触的详细过程, 此过程与传统的倒立摆模型有着较大差别.

下一步工作将通过改变足地接触介质, 得到不同的接触参数下行走测试结果, 会有更多有意义的结论.

参考文献

- 1 Fallis G T. Patent: Walking Toy. U. S. Patent, No. 376588, 1888
- 2 McGeer T. Passive bipedal running. *Proc R Soc Lond B*, 1990, 240: 107–134
- 3 McGeer T. Passive dynamic walking with knees. In: the Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation. Cincinnati: IEEE, 1990, 3: 1640–1645
- 4 McGeer T. Passive dynamic walking. *Int J Robot Res*, 1990, 9: 62–82
- 5 Garcia M, Chatterjee A, Ruina A, et al. The simplest walking model: Stability, complexity, and scaling. *J Biomech Eng*, 1998, 120(2): 281–288
- 6 Goswami A, Thuilot B, Espiau B. A study of the passive gait of a compass-like biped robot: Symmetry and chaos. *Int J Robot Res*, 1998, 17: 1282–1301
- 7 Wisse M, Hobbelen D G E, Schwab A L. Adding an upper body to passive dynamic walking robots by means of a bisecting hip mechanism. *IEEE Trans Robot*, 2007, 23(1): 112–123
- 8 Wisse M, Schwab A L, Linde R Q V. A 3D passive dynamic biped with yaw and roll compensation. *Robotica*, 2001, 19(03): 275–284
- 9 Wisse M, Schwab A L, van der Helm F C T. Passive dynamic walking model with upper body. *Robotica*, 2004, 22(06): 681–688
- 10 Coleman M J. A Stability Study of A Three-Dimensional Passive-Dynamic Model of Human Gait. Dissertation for Doctoral Degree. New York: Cornell University, 1998
- 11 Collins S R A, Tedrake R E A. Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walkers. *Science*, 2005, 307(5712): 1082–1085
- 12 Kuo D. Harvesting energy by improving the economy of human walking. *Science*, 2005, 309(5741): 1686–1687
- 13 McNeil A R. Walking made simple. *Science*, 2005, 308(5718): 58–59
- 14 Collins S H, Wisse M, Ruina A. A three-dimensional passive-dynamic walking robot with two legs and knees. *Int J Robot Res*, 2001, 20: 607–615
- 15 Tedrake R, Zhang T W, Ming-fai F, et al. Actuating a simple 3D passive dynamic walker. In: the Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Sendai: IEEE, 2004. 5: 4656–4661
- 16 Tedrake R, Zhang T W, Seung H S. Stochastic policy gradient reinforcement learning on a simple 3D biped. In: the Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2004. New Orleans: IEEE, 2004. 3: 2849–2854
- 17 Liu L M, Tian Y T, Li J F, et al. Switch control between different slopes for passive dynamic walker (in Chinese). *Control Decision*, 2011, 26(8): 1203–1208 [刘丽梅, 田彦涛, 李建飞, 等. 被动行走机器人变路况切换控制. *控制与决策*, 2011, 26(8): 1203–1208]
- 18 Zhang P J, Zhang D M, Tian Y T, et al. Dynamic modeling and stability analysis of passive biped robot (in Chinese). *J Beijing University*

- of Technology, 2009, 35(2): 258–263 [张佩杰, 张冬梅, 田彦涛, 等. 欠驱动双足步行机器人动力学建模与稳定性分析. 北京工业大学学报, 2009, 35(2): 258–263]
- 19 Zhao M G, Dong H, Zhagn N Y. On disturbance rejection of the bipedal robots in virtual slope walking (in Chinese). Robot, 2010, 32(6): 773–780 [赵明国, 董浩, 张乃尧. 双足机器人虚拟斜坡行走的抗扰能力研究. 机器人, 2010, 32(6): 773–780]
- 20 Duan W J, Wang Q, Wang T S. Simulation research of a passive dynamic walker with round feet based on non-smooth method (in Chinese). Chin J Theor Appl Mech, 2011, 43(4): 765–774 [段文杰, 王琪, 王天舒. 圆弧足被动行走器非光滑动力学仿真研究. 力学学报, 2011, 43(4): 765–774]
- 21 Mao Y, Wang J X, Jia P F, et al. Passive dynamic biped walking: A survey (in Chinese). Robot, 2007, 29(03): 274–280 [毛勇, 王家祯, 贾培发, 等. 双足被动步行研究综述. 机器人, 2007, 29(03): 274–280]
- 22 Fu C L, Huang Y L, Wang J M, et al. Quasi open-loop control for semi-passive biped robots (in Chinese). Robot, 2009, 31(2): 110–117 [付成龙, 黄元林, 王健美, 等. 半被动双足机器人的准开环控制. 机器人, 2009, 31(2): 110–117]
- 23 Liu N, Li J F, Wang T S. Period-doubling gait and chaotic gait of biped walking model (in Chinese). Acta Phys Sin, 2009, 58(6): 3772–3779 [柳宁, 李俊峰, 王天舒. 双足模型步行中的倍周期步态和混沌步态现象. 物理学报, 2009, 58(6): 3772–3779]
- 24 Qi F, Wang T S, Li J F. The elastic contact influences on passive walking gaits. Robotica, 2011, 29(Part 5): 787–796

The introduction of the passive walking testing system and experimental study

QI Feng^{*}, BI LaiYe & WANG TianShu

School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084, China

In this paper, we represent the testing system of the planar compass-like passive walking model. The testing parameters in the experiment are the swing angles and angular velocities of the legs as well as the contact forces between the feet and the ground. The sensors we chose are the gyros and the Flexiforce film sensors. With the testing system we established, the contact process in passive walking is described in detail.

passive walking, testing system, gyros, Flexiforce sensors, contact

PACS: 05.45.-a, 45.50.Jf, 45.50.Pk, 95.55.Pe, 96.12.De

doi: 10.1360/132012-731