

文章编号: 1002-0446(2007)03-0274-07

# 双足被动步行研究综述\*

毛勇, 王家庆, 贾培发, 韩灼

(清华大学计算机科学与技术系智能技术与系统国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 总结了被动步行的特点和研究现状, 介绍了几款国外主要的被动步行机器人的机构设计和驱动系统设计, 对被动步行研究中的稳定性问题、能量优化问题以及控制和学习方法进行了综述, 并指出了被动步行领域的研究难点和未来研究方向。

**关键词:** 动能学; 稳定性; 控制方法; 被动步行; 双足机器人

**中图分类号:** TP24      **文献标识码:** A

## Passive Dynamic Biped Walking: A Survey

MAO Yong WANG Jia-qing JIA Pei-fa HAN Zhuo

(State Key Laboratory of Intelligent Technology and Systems, Department of Computer Science and Technology,  
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** This paper surveys the current status and characteristics of passive dynamic walking. The mechanical structures and driving system designs of several passive walking robots are given. The research methods for the stability, energy efficiency and control scheme of passive bipeds are overviewed. To conclude, this paper points out the main difficulties and the future works in this field.

**Keywords** energetics, stability, control scheme, passive dynamic walking, biped robot

### 1 引言 (Introduction)

相比于一般的移动机器人, 双足机器人由于在非结构化环境中具有更好的移动能力而受到研究者的广泛关注<sup>[1]</sup>. 传统的双足机器人研究主要基于 ZMP (zero moment point) 稳定判据<sup>[2]</sup>和工业机器人轨迹跟踪控制方法. 虽然稳定的双足动态行走已经在日本索尼公司的“QRIO”<sup>[3]</sup>和本田公司的“Asimo”<sup>[4,5]</sup>等多个双足机器人项目中成功实现, 但此类机器人一般依赖大力矩、高增益反馈的驱动系统以及上层的轨迹规划和姿态平衡控制. 复杂的控制和驱动系统不仅造成了此类机器人的能量效率低下, 而且不利于通过步态合成的方法研究人类步行的本质特征.

由 McGeer<sup>[6]</sup>首先提出的被动步行研究方法是一种不同于传统方法的双足步行研究思路. 纯被动机器人是一组通过转动关节铰接的刚体机构, 可以在无主动驱动的情况下, 充分利用机器人自身的被动

动力学特性, 仅依靠重力稳定地走下斜坡. McGeer 将这种方法与早期对于飞机的研究作了一个形象的对比, 人们通过对于无动力的滑翔机的实验充分掌握了空气动力学原理和控制方法后, 在滑翔机的基础上相对容易地增加动力系统从而实现了有动力飞行. 同样, 被动步行研究方法的主要思路也是首先研究无驱动的纯被动双足机器人. 由于其结构和控制的简单性, 通过仿真和实验的方法可以从中抽取出双足步行的本质特征. 在充分分析此类原型系统的基础上逐步加大机器人结构的复杂度, 研究引入驱动的半被动步行 (quasi-passive walking) 机器人. 最终, 利用所得的结论指导机器人的设计和控制, 从而实现稳定、鲁棒、高效的仿人双足步行.

这种方法与传统的主动双足步行研究相比主要有以下几点不同. 首先, 主动机器人试图通过大力矩和高增益反馈的驱动系统来控制 and 改变机器人的动力学特性, 而被动步行则强调充分利用机器人自身

\* 收稿日期: 2006-05-23

机构固有的被动动力学特性. 这种特点使得被动机器人天生具有自然的步态, 以及与人类步行相似的能量效率, 而传统的主动双足机器人一般只能达到人类步行能量效率的 10% 以下<sup>[7]</sup>. 其次, 被动步行更强调对于人类步行本质特征的挖掘. 为了从复杂的步行现象中抽取出人类步行的本质特征, 可以采用搭建机器人原型系统的步态合成 (gait synthesis) 方法, 或是研究人类步行数据的步态分析 (gait analysis) 方法. 再次, 由于人类步行中对于被动动力学特性的利用非常充分, 并在鲁棒性和能量效率等方面表现出优秀的性能, 所以被动步行研究往往与仿生学和生物力学结合紧密. 此外, 在分析方法上, 被动步行一般采用非线性系统的研究方法.

在研究内容上, 被动步行研究主要关注双足机器人机构设计的合理性、步行周期的稳定性、步行各阶段的能量特点以及通过与环境的交互学习实现机器人的鲁棒控制器等问题. 其成果除应用于双足机器人的构建外, 还主要应用于医疗康复设备和假肢的设计, 以解决下肢残疾或截肢病人的康复问题<sup>[8]</sup>.

## 2 被动步行研究内容 (Contents of passive walking research)

传统的主动双足步行机器人通常采用基于工业机器人的轨迹跟踪控制, 通过复杂的驱动、控制系统改变机器人的动力学特性以实现预定义的轨迹. 由于并没有对机器人的被动动力学特性进行充分的利用, 此类机器人一般都有能量效率低下、控制系统结构复杂的缺点. 为了解决这一问题, 加拿大的 M cGeer

提出了被动动态步行的思路. 在文 [6] 中, M cGeer 构建了 2D 无膝关节的纯被动机器人, 见图 1 这种机器人并无驱动和控制系统, 它的机构非常简单, 只有髋关节 1 个自由度, 并且利用分别连接在一起的 2 条内腿和 2 条外腿保证机器人的侧向平衡. 进一步地, M cGeer 对上述机器人进行了扩展, 构建了有膝关节的双足被动机器人<sup>[9]</sup>, 见图 2 并研究了在髋关节和两腿上引入弹性器件的双足被动跑步问题<sup>[10]</sup>.

M cGeer 的纯被动机器人的两杆仿真模型如图 3 所示. 适当地调节这种机器人的初始条件 (初始关节角度和初始关节角速度), 使之和机器人的被动动力学特性及环境参数 (斜面坡度) 相适应, 就可以保证机器人稳定地走下坡度一定的斜面. 在这种纯被动的行走过程中, 每个步态周期都类似于一个倒立摆的摆动过程, 连续步行由多个倒立摆摆动周期衔接构成. 步行中的能量消耗主要产生于两个相邻步态周期衔接转换时足与地面间的冲击, 而能量的补充则完全由重力提供. 通过对这种机器人的仿真和实验, M cGeer 分析了纯被动步行的稳定性问题和能量问题, 并得到了机器人的机构参数对于步行性能的影响. M cGeer 的分析奠定了被动动态步行研究方法的基础. 这种方法的主要过程如下: 首先, 由被动机器人模型的运动学和动力学方程得到机器人步态参数从一个步态周期到下一个步态周期的转换方程 (step-to-step function); 然后, 求解此方程可以得到有稳定步行周期的初始参数条件. 以解得的稳定步行周期为基础, 就可以利用局部线性化方法进行稳定性分析, 并进一步对能量特性进行研究.

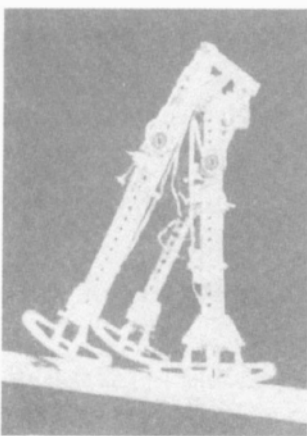


图 1 无膝纯被动机器人  
Fig. 1 Passive walking biped without knees

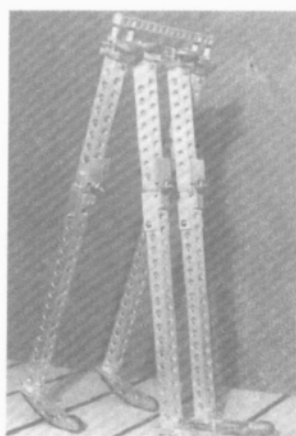


图 2 有膝纯被动机器人  
Fig. 2 Passive walking biped with knees

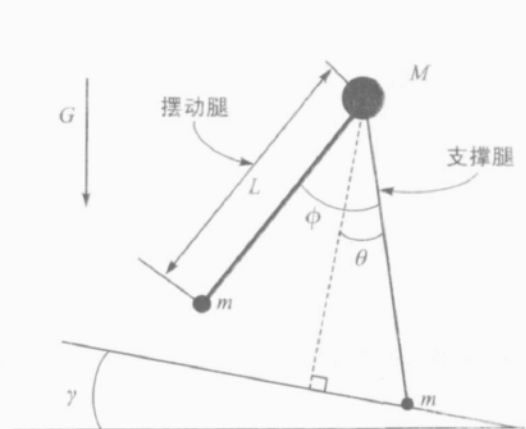


图 3 被动步行仿真模型  
Fig. 3 Simulation model of passive dynamic walking

自 McGeer 的开创性工作后, 美国、欧洲与日本的多所大学和研究机构在被动步行领域开展了深入的研究. 随着研究的深入, 所构建的被动机器人原型的复杂度也在逐渐加大, 从完全无驱动的纯被动机器人逐步转向了部分自由度带驱动的半被动步行机器人. 在半被动机器人中比较典型的有 Delft 大学的 “M ke” 半被动机器人. “M ke” 在 McGeer 的 2D 纯被动机器人的基础上增加了髋关节的主动驱动. 它的控制器是一个利用摆动脚着地和离地等事件实现的有限状态自动机, 由它控制髋关节进行摆腿运动, 通过适当调节摆动腿的速度和角速度参数就可以实现被动步行稳定性定义下的稳定平地步行. Asano 提出的虚重力场 (virtual gravity field) 理论<sup>[11]</sup> 则对半被动步行的原理做出了解释. 将半被动双足机器人中的主动驱动力和重力的共同作用看作方向一定的虚重力场, 在虚重力场中运动的半被动机器人和走下斜面的纯被动机器人在动力学特性上就有了一定的一致性, 用这种方法可以将纯被动步行研究扩展到平地上.

此外, 在一些主动机器人的研究中也应用了被动态步行的思想. Pratt<sup>[12]</sup> 在对 Spring Frango 机器人的步行控制中, 就在摆腿动作的后半阶段利用摆动腿的被动动力学轨迹降低了能量消耗和控制器的动作频率.

综上所述, 被动态步行并不是某一种特定的方法, 而可以被理解为一种双足步行的研究思路. 在被动步行的研究中, 机器人的控制和驱动系统的结构都比较简单, 机器人的稳定步行并不依赖于复杂的轨迹规划和精确的轨迹跟踪控制, 而是通过离线或在线的参数调整, 主要依靠机器人自身的被动动力学特性实现. 由于尽可能地消除了驱动和控制系统对步行的影响, 从对仿真和实验结果的分析中就可以有效地提取出步行的本质特征. 从而进一步利用所得的结论指导双足机器人的设计和控制, 实现降低控制器的复杂度和机器人整体能量消耗的目的.

### 3 被动机器人机构 (Mechanism of the passive robots)

在被动步行的研究中, 一般采用步态合成 (gait synthesis) 的方法. 这种方法首先构建被动机器人机构, 然后通过调节被动机器人的步态参数实现稳定步行, 在对实验结果进行分析的基础上得到有价值的结论. 下面介绍几种主要的被动机器人的机构特

点.

#### 3.1 Cornell 大学的被动机器人

Cornell 大学最新的半被动机器人<sup>[13]</sup> (图 4) 重 12.7 kg 腿长 0.81 m, 可以实现 0.44 m/s 的平地稳定步行. 它共有 5 个自由度, 其中 1 个髋关节自由度和 2 个膝关节自由度为不受控的自由关节, 2 个踝关节自由度由弹簧和电机组成的驱动器驱动. 它的上体由联动 (bisecting) 机构保证总处于两腿的角度平分线上, 双臂也由机械结构保证与对应腿的运动关联, 因而并不引入新的自由度. 在机器人的踝关节驱动器中, 弹簧起着弹性储能器件的作用. 控制器控制弹簧在摆动腿落地前的时刻释放, 从而提供一个 “推起” (push-off) 的冲量. 这个过程为连续步行补充了能量, 同时将质心的速度方向改变到下一个步态周期的初始值, 使连续稳定步行成为可能.

#### 3.2 MIT 的被动机器人

MIT 的无膝关节被动机器人 (图 5) 的结构更为简单. 它共有 6 个自由度, 其中每个踝关节有 2 个自由度分别由 2 个伺服电机驱动, 2 个髋关节为被动关节. 在此平台上的研究主要集中于通过学习生成控制策略的问题. Tedrake<sup>[14]</sup> 认为机器人行走的过程是一种与环境进行交互学习的过程. 他利用再励学习 (reinforcement learning) 的方法实现了在有环境扰动情况下的自适应稳定步行控制器.

#### 3.3 Delft 大学的被动机器人

荷兰 Delft 大学在被动机器人机构搭建方面的研究最具代表性. 他们所构建的机器人从 McGeer 式的纯被动机器人开始, 复杂度逐步增大<sup>[15]</sup>. 系统地研究了髋关节驱动系统、上体以及为实现 3D 步行所引入的踝关节等部件对行走的稳定性和能量效率的影响.

“M ke” 机器人<sup>[16]</sup> 是在 McGeer 的无膝关节纯被动机器人的基础上开发的半被动机器人. 增加了髋关节的主动控制, 驱动系统利用 McKibben 气动人工肌肉实现. 它的控制器控制髋关节实现摆动角度和角速度一定的摆腿动作, 为连续步行补充了能量. 它的能量效率与人类行走类似.

“M ax” 机器人<sup>[17]</sup> 是在 “M ke” 机器人的基础上增加上体的单自由度 2D 半被动机器人. 它通过联动 (bisecting) 机构保证了引入上体时不增加额外的自由度.

在 “M ax” 机器人的基础上, Wisse<sup>[18]</sup> 构建了 3D 半被动机器人 “Denise” (图 6). “Denise” 重 8 kg 高 1.5 m, 共有 5 个自由度, 其中膝关节和踝关节各有 2

个不受控的自由度, 髋关节自由度则是由 McKibben 气动肌肉驱动的主动自由度. 它的踝关节采用特殊的机构设计, 将机器人的侧倒 (lean) 运动和转向 (steering) 运动相耦合, 从而使机器人在保持一定临界运动速度以上时可以实现 3D 稳定步行.

“Meta”<sup>[19]</sup> 机器人 (图 7) 是 Delft 大学最新的半被动机器人. 它共有 5 个自由度, 其中 2 个膝关节为被动自由度, 2 个踝关节和 1 个髋关节为主动自由度. 生物力学的研究表明, 在人类步行中踝关节的主动驱动起着重要的作用. 但现阶段对如何在双足机

器人中应用踝关节驱动的研究还非常不足. 构建 “Meta” 机器人的主要目的就是通过步态合成的方法揭示踝关节的主动驱动在步行中的作用. 值得注意的是, 由于在前面一系列机器人中使用的气动人工肌肉驱动器的性能并不理想, “Meta” 机器人的驱动力已经改为由伺服电机提供.

### 3.4 其他

除上述机器人之外, CMU 大学、东京理工大学等研究机构也实现了各自的 McGeer 型纯被动机器人和简单的半被动步行机器人.

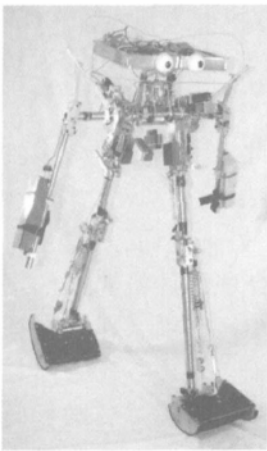


图 4 Cornell 的被动机器人  
Fig. 4 Passive walking biped of Cornell's

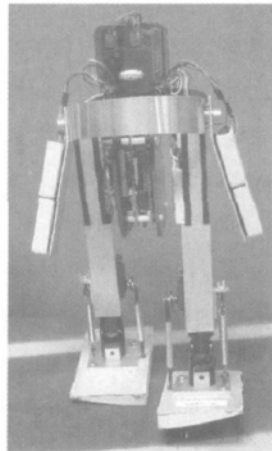


图 5 MIT 的被动机器人  
Fig. 5 Passive walking biped of MIT's

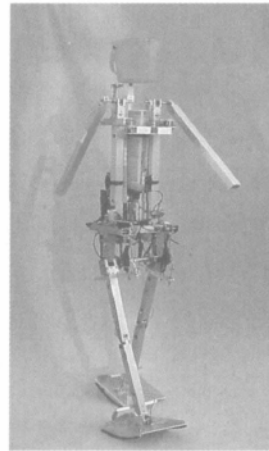


图 6 “Denis” 被动机器人  
Fig. 6 “Denis” passive walking biped

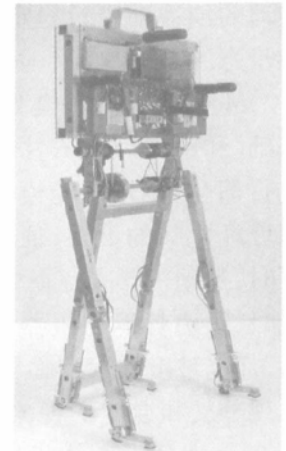


图 7 “Meta” 被动机器人  
Fig. 7 “Meta” passive walking biped

## 4 主要研究问题和方法 (Main research topics and methods)

在被动步行研究的框架下, 以下 3 个重点问题受到研究者的普遍关注, 它们是: 步行稳定性问题, 能量效率与能量消耗、补充问题, 以及学习和控制问题. 下面分别对这 3 个重点问题的研究中所采用的主要方法和结论做以总结.

### 4.1 稳定性问题

在双足步行的研究中, 首要问题是保证机器人实现稳定的动态步行. 但被动步行和传统的主动步行不同, 在这一问题上有自身的特点. 传统的动态步行稳定性判别主要基于 ZMP 稳定判据, 它要求在连续步行中的每一时刻机器人都符合此稳定判据. 因此, 传统的动态步行步态规划的一般步骤是先规划期望的 ZMP 轨迹, 然后在 ZMP 轨迹的基础上根据机器人的动力学方程规划各主动驱动自由度的关节角轨迹. 最后, 通过轨迹跟踪控制的方法, 精确控制机器人实现规划所得的关节角轨迹, 以保证机器人在

步行中的任意时刻满足稳定性的要求.

与主动步行中时间连续的稳定性概念不同, 被动步行中的稳定性是一个时间离散的概念. 被动步行强调充分利用机器人自身的被动动力学特性, 而不是用主动控制的方式将运动轨迹锁定到稳定轨迹上, 它一般只考虑步行周期的稳定性. 被动步行中每步只观察一次机器人步态参数的状态, 若步态参数在 1 个或几个步态周期后可以映射到自身的初始值, 并且对于小范围的扰动收敛, 则可以认为这种步行是稳定的.

在这种稳定性的定义下, McGeer<sup>[6]</sup> 提出了利用 step-to-step 方程研究被动步行理论的方法. 这种方法首先用一组参数抽象描述机器人步态. 然后, 通过分析单腿支撑相 (single support phase) 和双腿支撑相 (double support phase) 的动力学模型和落地脚冲击 (heel-strike) 模型得到机器人参数从一个步态周期到下一个步态周期的一组微分方程, 即 step-to-step 方程. 然后, 利用 Newton-Raphson 方法, 通过迭代的

方式搜索参数空间,数值求解方程的周期解.若找到符合条件的参数集合,则将此参数集合称为参数空间中的不动点(fixed point),求解得到的周期被称为有限周期(limited cycle).可以证明,机器人在此参数集合的初始条件下有周期性的步态.进一步地,为了证明在此参数集合下机器人的动态步行渐近稳定,用线性化的方法将step-to-step方程写为雅可比矩阵的形式,并对矩阵进行特征值分析,如果矩阵的所有特征值向量在复平面内都处于单位圆以内,则认为机器人对于局部的小扰动具有渐近稳定性.应用这种方法,McGeer分别分析了无膝关节、有膝关节和跑动的纯被动步行稳定性问题,并定义了3种稳定的步态.

McGeer的方法奠定了被动步行稳定性分析的基础.利用类似的方法,Garcia<sup>[20]</sup>将McGeer的模型进行简化,利用最简模型分析了纯被动步行的速度与坡度之间的关系,证明了斜面坡度在某临界值以下时,被动机器人存在稳定的步态周期.且当坡度降低时,重力势能与机器人的步行速度成4次幂的关系.而当坡度增大到临界值以上时,机器人的步态会出现分叉和混沌的现象.Chatlerjee<sup>[21]</sup>进一步证明了McGeer式的无上体机器人在平地不能以有限速度行走.

McGeer的稳定性分析方法本质上是通过线性化进行的局部分析.这种方法只能回答“此步态在小扰动下是否稳定?”,而不能回答“步态稳定程度如何?或在多大的扰动情况下是否可以保持稳定?”的问题.为此Wisse<sup>[15]</sup>对原有的分析方法做出了扩展.他将step-to-step方程进一步在参数空间中用Poincaré图表示,并利用胞映射法(cell mapping)方法在Poincaré图上找到吸引区域(basin of attraction).仿真实验证明,在此参数空间区域内的初始值在多个步态周期后会收敛到固定点(fixed point)上,也即将吸引区域看作机器人参数空间中的稳定区间.这种方法本质上是一种全局性的稳定性分析方法,可以用来对步行的稳定程度进行有效度量.利用这种方法,Wisse<sup>[22]</sup>分析了半被动机器人设计中的稳定性问题,包括坡度、髋关节的弹簧刚度,以及上体高度、质量等对于稳定性的影响.证明了引入髋关节驱动可以大大增大被动机器人的吸引区域,并可以完全解决2D机器人行走中容易出现的向前跌倒问题.

## 4.2 能量问题

相比传统的主动步行双足机器人,被动机器人

在能量效率上具有很大的优势.一般地,定义一种无量纲的指标COT(cost of transport)来衡量能量效率.此指标的定义如下: $COT = (\text{能量消耗}) / (\text{质量} \times \text{距离})$ .Collins等<sup>[7]</sup>给出了Comell大学、Delft大学和MIT的3种半被动机器人的机械能COT和总COT(考虑驱动器控制器效率)的值.实验表明,Comell的机器人的机械能COT约为0.055,总COT约为0.2. Delft大学的机械能COT约为0.08, MIT机器人的机械能COT约为0.02,而人类步行的机械能COT约为0.05,总COT约为0.2.半被动机器人与人类步行能量效率指标在数量级上近似.与主流的主动机器人比较,本田公司的Asimo机器人机械能COT约为1.6,总COT约为3.2,其能量效率为人类步行数据的10%以下.

被动机器人能够达到如此之高的能量效率主要是由于充分利用了机器人自身的被动动力学特性,并避免使用大力矩的驱动器.另一方面,对于步行过程中能量消耗的研究,也为合理设计机器人的结构和步态从而达到能量最优的步行提供了理论依据.

在被动步行能量问题的研究中,一般采用和仿生学、生物力学结合的方式,利用人类步行数据验证研究结论.Srinivasan和Ruina<sup>[23]</sup>通过被动步行仿真实验分析,提出了人类对于步态的选择标准是能量优化准则的假设.人在较低运动速度下会选择能量消耗较低的走路方式,而在较高速度下跑步的能量消耗要低于走路,人们此时会自动做出最优的选择.此外,仿真实验表明,在走和跑的中间状态中还存在一种可称为摆跑(pendulum running)的能量最优步态.Gordon等<sup>[24]</sup>研究了质心(COM)的运动对于能量消耗的影响,否定了原有的认为质心竖直运动幅度最小的步态为能量最优步态的结论,认为同等条件下类似倒立摆的步行方式是能量最优的步行方式.Kuo<sup>[25]</sup>结合仿真和步态分析方法,重点研究了人类步行各个阶段的能量特点.他将步态周期细分为4个阶段,并对每个阶段的机械功和新陈代谢能量发生的位置和大小进行了分析.证明了同等运动速度下能量的消耗与步长、步宽等步态参数之间的关系,完整地解释了人类步行中步态参数选择的原因.同时,这个结论也为机器人选择合理的步态参数提供了理论依据.

除步态参数的选择外,被动步行机器人步态规划和结构设计问题也与能量消耗和补充(restoration)问题紧密相关.被动步行中摆动脚落地时的碰撞冲击很大程度上影响了能量消耗.平稳步行中的能量

消耗主要由驱动器所做的正功、驱动器所做的负功、滑动摩擦力做功和碰撞组成. 其中大部分能量消耗来自于碰撞, Ruina 据此结论, 利用求解动力学微分方程的方法设计了无碰撞冲击的被动步行步态. Wisse<sup>[17]</sup>研究了机器人上体对于能量效率的影响, 仿真和实验均表明有上体的机器人的能量效率更高. Collins 和 Ruina 在设计 Cornell 最新的被动机器人<sup>[13]</sup>时, 通过消除驱动器的负功降低了能量消耗, 使机器人的能量效率得到了优化.

### 4.3 控制与学习问题

生物力学与仿生学的结论<sup>[26]</sup>表明, 控制人类运动的神经—肌肉—骨骼系统, 一般并不具有主流的双足机器人所要求的高精度和高频的控制性能. 因此, 被动步行中的控制器一般都具有相当简单的结构. 早期的半被动机器人大多采用开环的控制策略. 而随着对机器人适应不同地形的鲁棒性和多样性的要求不断提高, 多种反馈和学习的控制策略也被引入到被动步行中来. 现在, 这部分研究内容是被动步行研究中非常活跃的一部分.

Atkeson 利用神经元振子 (neural oscillator)<sup>[27]</sup>和非线性振子 (nonlinear oscillator)<sup>[28]</sup>, 模仿动物运动的中央模式发生器 (central pattern generator) 生成了自适应的控制策略, 并在实验中成功控制了五连杆 2D 机器人进行稳定步行. Tedrake<sup>[14]</sup>将机器人的行走看作是与环境进行交互的过程. 他利用再励学习的方法自动生成控制策略, 控制 MIT 的被动机器人在无任何先验知识的情况下在 600 个步行周期后收敛到稳定步态. Wisse<sup>[19]</sup>则将再励学习的方法应用到更复杂的“Meta”机器人上. 与 Tedrake 和 Wisse 的研究中采用无模型的再励学习方法不同, Atkeson<sup>[29]</sup>利用基于 Poincaré 图模型的再励学习方法得到了更快的学习速率. 基于仿生学的结果, Geng<sup>[30]</sup>提出了一种新的类似神经—肌肉系统的控制器结构, 并控制机器人生成了可在线调节速度的运动步态, 但在这种方法中控制器的参数尚需要手动调节.

## 5 难点问题和未来工作 (Difficulties and future works)

当前, 被动步行的研究尚存在着许多难点问题. 同时, 这些难点问题也指明了被动步行中值得注意的研究趋势.

(1) 步行中踝关节驱动在推起 (push-off) 和脚跟落地 (heel-strike) 中起着重要的作用, 但其具体机制尚没有一个明确的结论. 正是由于这个原因, 早期的

大多数被动机器人都未在踝关节中引入驱动, 未来的被动机器人会逐渐引入踝关节的驱动, 并对此问题做出相应的研究.

(2) 通过对被动步行的研究最终要完成的是仿人、鲁棒、高效的行走. 所以, 虽然当前被动机器人的控制结构相当简单, 但控制模型的构建和与环境交互的在线学习将是未来研究中一个非常重要的问题.

(3) 步行过程中侧向的姿态平衡还没有得到充分的研究. 虽然, Wisse 利用机器人的侧倒与转向耦合得到了一定速度下的稳定 3D 步行. 但这种结果显然并不能令人满意. 生物力学和仿生学的结果表明人类步行中依赖侧向落脚位置的调整保持平衡和稳定. 未来工作中, 将把这一结论应用到机器人的侧向平衡控制中.

(4) 人类的肌肉—骨骼系统具有柔性的特点, 且刚度会随着步态周期和地形而改变. 这种特性可以降低冲击, 提高能量效率. 这对于柔性驱动器的设计及其控制将是一个重点问题.

(5) 当前的被动机器人在多样性上有很大不足. 未来将研究如何控制机器人完成转向、启停、上下楼梯、跌倒爬起等动作.

## 6 结论 (Conclusion)

被动步行是双足步行领域中一种重要的研究思路. 它构建无驱动或只有较少自由度驱动的机器人, 充分利用其自身固有的被动动力学特性实现双足行走. 由于被动机器人的驱动和控制系统一般具有简单的结构, 仿真和实验的结果中尽可能地去除了它们的影响, 因此可以从中揭示出人类步行的本质特征. 本文介绍了被动步行研究的思路和机构特点, 并对步行稳定性问题、能量问题和控制与学习问题 3 个重点问题进行了综述. 并在最后指明了当前研究中的难点问题和未来研究方向.

## 参考文献 (References)

- [1] Huang Q, Yokoi K, Kajita S, *et al*. Planning walking patterns for a biped robot [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2001, 17(3): 280–289.
- [2] 伍科布拉托维奇. 步行机器人和动力型假肢 [M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [3] Ishida T. Development of a small biped entertainment robot ORID [A]. Proceedings of the 2004 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science [C]. New York, NY, USA: IEEE, 2004: 23–28.
- [4] Sakagami Y, Watanabe R, Aoyama C, *et al*. The intelligent ASH

- MO: system overview and integration[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems[C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 2002 2478–2483
- [5] Hirai K, Hirose M, Hukawa Y, *et al*. Development of Honda humanoid robot[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 1998 1321–1326
- [6] McGeer T. Passive dynamic walking[J]. The International Journal of Robotics Research 1990 9(2): 62–82
- [7] Collins S, Ruina A, Tedrake R, *et al*. Efficient bipedal robots based on passive dynamic walkers[J]. Science, 2005, 307(5712): 1082–1085
- [8] Wisse M, Schwab A L, Linde R Q V. A 3D passive dynamic biped with yaw and roll compensation[J]. Robotica 2001, 19(3): 275–284
- [9] McGeer T. Passive walking with knees[A]. Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation[C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 1990 1640–1645
- [10] McGeer T. Passive bipedal running[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences 1990 240(1297): 107–134
- [11] Amano F, Yanakita M, Kanamichi N, *et al*. A novel gait generation for biped walking robots based on mechanical energy constraint[J]. IEEE Transactions on Robotics 2004, 20(3): 565–573
- [12] Pratt J, Pratt G. Exploiting natural dynamics in the control of a planar bipedal walking robot[J]. Proceedings of the Thirty-Sixth Annual Allerton Conference on Communication, Control and Computing[C]. Urbana, IL, USA: University of Illinois 1998 739–748
- [13] Collins SH, Ruina A. A bipedal walking robot with efficient and human-like gait[A]. Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation[C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 2005 1983–1988
- [14] Tedrake R, Zhang T W, Seung H S. Stochastic policy gradient reinforcement learning on a simple 3D biped[A]. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems[C]. New York, NY, USA: IEEE, 2004 2849–2854
- [15] Wisse M. Essentials of Dynamic Walking: Analysis and Design of Two-Legged Robots[D]. Netherlands: TU Delft 2004
- [16] Wisse M, van Frankenhuyzen J. Design and construction of MKE: a 2D autonomous biped based on passive dynamic walking[A]. Proceedings of the International Symposium on Adaptive Motions of Animals and Machines[C]. Tokyo, Japan: Springer-Verlag 2003 143–154
- [17] Wisse M, Schwab A L, van der Helm F C T. Passive dynamic walking model with upper body[J]. Robotica 2004 22(6): 681–688
- [18] Wisse M. Three additions to passive dynamic walking: actuation, an upper body, and 3D stability[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Humanoid Robots[C]. New York, NJ USA: IEEE, 2004 113–132
- [19] Schuitman E, Hobbelen D G E, Jonker P P, *et al*. Using a controller based on reinforcement learning for a passive dynamic walking robot[A]. Proceedings of the IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots[C]. New York, NY, USA: IEEE, 2005 232–237
- [20] Garcia M, Chatterjee A, Ruina A. Speed, efficiency, and stability of an all-slope 2D passive dynamic bipedal walking[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 1998 2351–2356
- [21] Chatterjee A, Garcia M. Small slope implies low speed for McGeer's passive walking machines[J]. Dynamics and Stability of Systems 2000 15(2): 139–157
- [22] Wisse M, Schwab A L, van der Linde R Q, *et al*. How to keep from falling forward: elementary swing leg action for passive dynamic walkers[J]. IEEE Transactions on Robotics 2005 21(3): 393–401
- [23] Srinivasan M, Ruina A. Computer optimization of a minimal biped model discovers walking and running[J]. Nature, 2006 439(7072): 72–75
- [24] Gordon K E, Ferris D P, Kuo A D. Reducing vertical center of mass movement during human walking doesn't necessarily reduce metabolic cost[A]. Proceedings of the 27th Annual Meeting of American Society of Biomechanics[C]. American Society of Biomechanics, Toledo, Ohio 2003 <http://www-personal.engin.umich.edu/~artkuo/Papers/ASB03GordonPoster.pdf>
- [25] Kuo A D, Donelan J M, Ruina A. Energetic consequences of walking like an inverted pendulum: step-to-step transitions[J]. Exercise and Sport Sciences Reviews 2005 33(2): 88–97
- [26] Zajac F. Muscle and tendon properties: models, scaling and application to biomechanics and motor control[J]. CRC Critical Reviews in Biomedical Engineering 1989, 17(4): 359–411.
- [27] Endo G, Morimoto J, Nakanishi J, *et al*. An empirical exploration of a neural oscillator for biped locomotion control[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 2004 3036–3042
- [28] Nakanishi J, Morimoto J, Endo G, *et al*. An empirical exploration of phase resetting for robust biped locomotion with dynamical movement primitives[A]. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems[C]. New York, NY, USA: IEEE, 2004 919–924
- [29] Morimoto J, Nakanishi J, Endo G, *et al*. Poincaré map-based reinforcement learning for biped walking[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. New York, NY, USA: IEEE, 2005 2381–2386
- [30] Geng T, Porr B, Worgatter F. Fast biped walking with a sensor-driven neuronal controller and real-time online learning[J]. The International Journal of Robotics Research 2006 25(3): 243–259

## 作者简介:

毛勇 (1979-), 男, 博士生. 研究领域: 双足机器人, 被动步行, 步态规划.

王家庆 (1942-), 男, 教授. 研究领域: 机器人控制, 智能控制, 虚拟现实, 模式识别等.

贾培发 (1946-), 男, 教授. 研究领域: 智能控制, 智能机器人, 虚拟现实等.