



# 双足仿人硬件设计：技术回顾

Grzegorz Ficht<sup>1</sup>  - Sven Behnke<sup>1</sup>

接受：2021年3月8日

© 作者 2021

## 摘要

**综述目的** 随着新技术的进步，人们正在设计和制造利用这些技术的仿人机器人。为了做出最佳设计选择，有必要对现有技术的优缺点进行全面了解。本文旨在对现有方法进行分析，并与新兴方法进行对比。

**最新发现** 近期仿人机器人的设计特点正在发生明显转变，这一点已得到文献资料的支持。由于仿人机器人要走出实验室，走向世界，因此必须具备顺应性和更高效的运动能力。不同的研究小组正以独特的方式解决高刚性驱动的局限性。一些研究小组侧重于修改运动结构，而另一些研究小组则改变了驱动方案。借助新的制造能力，以前不可能实现的设计正在变得可行。

**摘要** 对双足仿人机器人的关键技术进行了全面回顾。文中讨论了不同的机械概念，以及执行、传感和制造方面的进展。本文还附有一份近期开发的平台清单，以及这些平台的部分规格。

**关键词** 仿人机器人 - 运动结构 - 驱动 - 传感器 - 3D 打印 - 制造

## 引言

仿人机器人技术已经取得了长足的发展，其各个分支的进展也在逐年加快。在短短半个世纪的时间里，从最基本、最吸引人的自动装置迅速发展成为一个全球性的跨学科研究领域。理论概念与现有技术的相互依存关系不断影响着仿人机器人技术的发展。目前的仿人机器人并不是单一的研究成果。

ficht@ais.uni-bonn.de

Sven Behnke  
behnke@ais.uni-bonn.de

<sup>1</sup> 德国波恩莱茵弗里德里希-威廉姆斯大学，弗里德里希-希尔泽布鲁赫大街 8 号，53115 波恩

科学上的突破，而是在各自使用的技术上逐步取得的小成就的积累。人形机器人并不是唯一的受益者，因为这种关系是相互的。更先进的平台增加了应用的复杂性，这反过来又促进了新技术解决方案的创造。由于这些进步，仿人机器人的形状、大小和功能各不相同（见图 1）。自 2000 年代初以来，仿人机器人的研究工作已经开展了很多，但当时的仿人机器人更多是在虚构的领域，只有少数几个有能力的机器人可用[1]。由于执行能力有限，许多研究人员只能使用较小的平台。尺寸是一个限制因素，因为较小的机器人无法在为人类设计的环境中进行有意义的互动，而这正是开发这些机器人的最终目标。另一方面，较大的机器人需要不成比例的更大驱动力，这使得制造这类机器人的任务变得更加困难[2]。正如在自然界中一样[3]，在尺寸和性能之间找到一个最佳的中间点至关重要。出于各种意图和目的，本综述侧重于旨在模仿人类双足移动能力的机器人，以及实现这一目标的最新技术进展。



图 1 从左到右，从上到下，最近开发的具有完整仿人身体结构的双足仿人机器人：Asimo、Atlas、Atlas-Unplugged、Digit、HRP-5P、Hydra、Kengoro、NimbRo-OP2X、TALOS、Toro、Valkyrie、WALK-MAN

## 机械结构

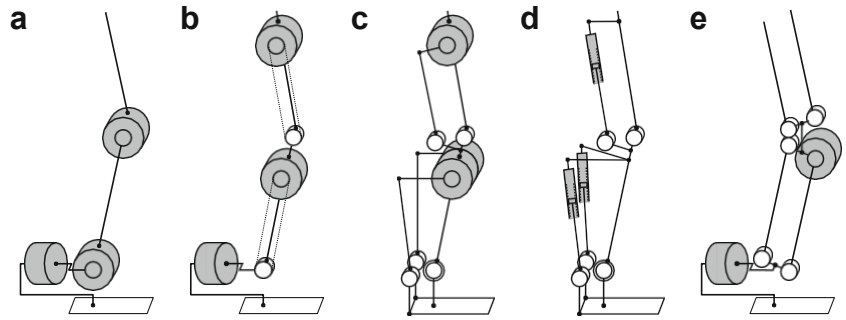
任何双足人形的显著特征都是其运动结构。最初，由于技术有限，只能简化人形，通常只有腿部。这并不是一个缺点，因为设计理念可能更倾向于简单的形式，这样就可以在控制部分做出并利用某些假设[4]。麻省理工学院的 3D Biped [5] 和 ATRIAS [6] 就是这种方法的完美范例。带有旋转髋关节的伸展腿足以执行三维定位功能，而不需要类似人类的外形。这两种机器人都独特地采用了弹簧加载倒立摆（SLIP）模板进行控制。麻省理工学院的 3D 双足机器人通过线性推进器实现控制，而 ATRIAS 则通过弹簧片将一对旋转致动器连接到四杆平行连杆的大腿前后部分。这两种结构都实现了髋部集中质量和低惯性腿；然而，由于 ATRIAS 腿部设计中的拮抗致动机制，大量能量被浪

费[7]。尽管这些机器人令人印象深刻，但它们主要被用作演示器，用于探索动态双足运动。

在更广泛的应用领域，人们已经制造出具有完整仿人身体结构的机器人。ASIMO [8]、HRP 系列 [9-14]、HUBO [15]、REEM-C [16] 和 TALOS [17] 等人形机器人都是杰出的例子。

在运动学方面类似。腿部由模拟球形关节的三自由度 (DoF) 髋关节、用于膝关节弯曲的一个 DoF 和用于踝关节球形关节的两个 DoF 组成。因此，六个致动器足以提供与人类腿部大致相同的外形和功能。这种结构还有一个额外的好处，就是能够为逆运动学提供封闭式解决方案。可以引入更多关节（如脚趾），以避免奇异点、关节限制或实现特定配置 [18]。上述机器人在串行配置中使用了带有伺服电机的旋转关节（图 2a）。这种结构在科学界已得到广泛认可和深入研究，采用这种结构的机器人数量之多就是明证。其优点在于简化了机械和控制，但缺点是能力有限。由于旋转执行器通常直接放置在关节处，因此靠近链条原点的执行器需要承载链条上较低位置的执行器。这对反向间隙或弹性累积有双重影响

**图 2** 小腿设计的配置示例：**a** 轴上串行机构，**b** 轴外串行机构，**c** 曲柄杠杆并行机构，**d** 线性致动器并行机构，**e** 串行/并行混合机构。灰色部件代表推杆



以及腿部惯性的增加。这两者都会造成定位不准确，而控制方案必须对其进行补偿。

肢体刚度的降低和腿部惯性的增加会对系统的整体动态性能产生重大影响，并对致动器的质量和功率输出提出了更高的要求。解决这一问题的方法是将致动器安装在离轴线较近的链接根部，并使用轻型耦合或传动装置（如同步带），如早期版本的 ASIMO [19]（见图 2b）。将执行器置于离轴位置会产生有趣的接头设计，其中可能涉及平行连杆。由于机械传动耦合，平行机构显示出更高的刚度，从而平均了致动误差。并联方案的缺点是工作空间有限，这是因为链接的匹配以及机械和计算复杂性的增加。有些机制可用于特定关节，有些可用于整条腿。斯图尔特平台型腿[20]可能会在加载能力方面带来好处，但有限的运动范围和膝关节的缺乏并不能转化为类似人类的能力[21]。

就类人关节而言，3-DoF 髌关节是腿部的根部，因此最不可能从并联结构中获益。要稍微降低惯性，就需要在机械开发方面投入大量资金[22]。由于这些机械上的复杂性，髌部的偏航通常仍由一个单独的旋转致动器来完成[23]，其反冲对整条腿的定位影响不大。髌关节的内收/外展以及屈曲和伸展可以用两个致动器来完成，它们的运动总和相当于俯仰，而差动则导致髌关节滚动[24]。由于希望髌关节有较大的运动范围，迄今为止只有少数机器人在髌关节中安装了平行连接装置，如最近的 RHP-2 [25]。并联膝关节的实现比较容

易，因为大腿连接处通常有足够的空间来放置致动器和传动装置。可能的选择包括在曲柄膝关节中使用旋转致动器。

如 WALK-MAN[26]和较新的 ASIMO[27]中的杠杆机

构,或线性致动器[28],既可拉动又可推动柄链。与非琐碎的连杆机构相结合,可显著降低所需的膝关节扭矩,从而获得更高的扭矩重量比,并因此获得更高的性能[29]。2-DoF 踝关节是使用平行连杆的最大优势,因为增加的刚度可以补充静态稳定的直立姿势,而无需消耗太多扭矩。与大腿类似,踝关节的柄部也为安装致动器和联轴器提供了充足的空间,使踝关节可以围绕卡丹式关节俯仰和滚动。因此,我们开发出了几种结构紧凑、外形美观的解决方案。其中包括 ASIMO [30]、TORO [31] 和 CogIMon [32] (图 2c) 中的曲柄杠杆机构,以及线性致动器方案 [28、33、34] (图 2d)。

除了针对特定关节的解决方案外,少数研究人员对运动结构采取了不同的方法。Gim 等人[35]设计了一种串联-并联混合腿,其中六个腿部致动器中的五个位于髌部。这大大降低了腿部惯性,进而降低了所需的关节速度和扭矩,使其更加均匀。这种结构已被用于制造双足机器人[36],与采用串行运动学链的参考机器人相比,从原点到CoM的距离(与腿长成比例)减少了15%[37]。假设只在平地上行走可以简化控制理论[38]。类比而言,机械部分也可以利用这一点。NimbRo-OP2(X)机器人[39][40]采用了五DoF串行平行腿结构,矢状面上有两个4杆连杆,横向上有一个串行链(图 2e)。4条受电弓限制了腿的方向,使脚与腰部保持平行。没有倾斜时,脚基本上与地面保持平行。驱动方案有本质区别,改变角度的不是髌关节和膝关节,而是大腿和小腿。致动器可放置在任何受电弓轴线上,并可同步以提高性能。使用这种

该设计还可以完全由髌部驱动，减少惯性[41]，并辅以弹簧以降低扭矩要求[42]。

仿生学是一个完全独立的设计概念，它激发了越来越多研究人员的灵感。由于仿人机器人应该模仿人类，因此自然不仅要利用仿人身体结构的概念，还要实现这一概念。具有生物关节驱动的肌肉骨骼结构可降低控制带宽要求，并允许两个关节之间进行协调和能量传递，从而提高效率[43-45]。使用柔性元件和肌腱可改善肢体的顺应性和冲击负荷[46]。如图所示，肌腱与骨架共存--即所谓的“张力结构”--大大减少了结构部件的应力，并允许使用更轻的部件，从而提高了动态性能[47]。由于多条肌腱穿过多个关节，因此有必要尽量减少摩擦或考虑摩擦[48]。完全仿生的仿人机器人仍然很少。Kenshiro [49] 及其后续产品 Kengoro [50] 是高度复杂的仿人机器人，具有与人类相似的身体结构，包括骨骼结构和解剖学上正确的肌肉排列。然而，由于多块“肌肉”的控制和协调非常复杂，这类机器人的潜力还有待挖掘。

## 启动

仿人机器人的设计涉及一个整体方法，机器人的结构与所选的执行器息息相关，反之亦然。从 20 世纪 80 年代中期开始，带有高比率减速器的电动推杆一直是默认的选择，因为它们能在扭矩、速度和尺寸之间实现良好的平衡。除了性能之外，使用电动推杆还有简化控制的好处，因为控制的输入输出关系几乎是线性的，而且电力储存和分配系统也很方便。提供必要扭矩所需的高传动比具有高增益控制机制的缺点。由于仿人机器人需要与环境进行越来越多的互动，力反馈控制变得越来越重要。但这并不能很好地应对高减速装置的刚性驱动，因为这种驱动会干扰电流/扭矩关系，而且对冲击负荷也不稳定。为了解决这个问题，我

们在致动器的结构中引入了一个弹性元件，使其成为一个 *串联弹性致动器* (SEA)，如 NASA 的 Valkyrie [51]。弹簧元件有几个作用：吸收冲击力、储存能量并通过挠度控制输出扭矩。



胡克定律。WALK-MAN[52]配备了 SEA 技术的最新进展,利用主动和被动适应[53]。通过在致动器的输出轴上引入弹性元件,可以使现有的人形机器人具有顺应性[54]。

无刷直流 (BLDC) 电机制造和控制领域的最新进展为我们提供了一种新方法。Katz [55] 巧妙地将 "薄饼式" 无刷直流电机的高扭矩密度与嵌入定子孔内的单级 1:6 行星减速器结合在一起。由于换向是通过正向、反向帕克变换和克拉克变换以电子方式进行的,因此可以直接通过 Q 轴电流来感应和控制输出扭矩。与嵌入式阻抗控制器相结合,这些准直接驱动 (QDD) 模块可实现稳健、顺应性和本体感觉驱动,并为动态运动提供高峰值功率。虽然这些致动器是为四足动物麻省理工学院迷你猎豹开发的[56],但也可用于双足动物[57]。这些致动器的改型 (如更长的定子、不同的减速器) 已在市场上推出,规格也有所提高,因此,顺应性和动态能力强的仿人机器人的普及只是时间问题。电机通常用于旋转运动,但也可通过平移 (如滚珠丝杠) 机构产生线性运动 [28, 34]。它们也可以作为直接驱动的线性电机来生产,这可以简单地理解为在导轨上 "展开" 一个旋转电机。

在大功率应用中,电机的磁饱和度和热极限都会限制电机的运行。功率要求越高,电机就越大。此外,电机还相当脆弱,过载或在敏感环境 (水、污垢) 中运行会很快导致电机损坏。液压装置则没有这些限制,因为它们具有功率密度高、扩展性好的特点,即使在恶劣的环境中也能在重负荷下停止而不会损坏。它们通常以活塞的形式生产,通过控制由可移动气缸分隔的两个腔室之间不可压缩液体 (通常为油) 的差值来实现线性运动。液压技术可实现的高功率规格吸引了机器人专家们建造第一台静态[58]和动态移动的双足机器人[5]。目前,波士顿动力公司 (Boston Dynamics) [59] 正利用这项技术走在仿人机器人技术的前沿。他们的第一个仿人机器人 PETMAN [60] 在

形态、活动范围、力量和行走方面都与人类无异。液压系后代 ATLAS (以及 ATLAS-DRC) [61] 是为研究在非结构化地形中导航而制造的。这两个机器人在当时给人留下了深刻印象,但也暴露了液压系统的局限性: 由于机器人是通过系绳进行操作的,其动力储存和分配不像电力系统那么容易。此外,机器人中的每个人



由于产生的噪音，机器人附近的人必须佩戴听力保护器。ATLAS- Unplugged 解决了这一问题，液压动力装置升级为可变压力设定点、小型化，并安装在机器人上。这一重新设计使 ATLAS 机器人能够完全自主运行，运行噪音也大大降低，但重量却从 152 公斤增加到 182 公斤[61]。新一代 ATLAS 机器人[62] 是多年来移动液压技术探索和发展的成果。通过将整个结构和部件（尤其是动力装置）小型化，ATLAS 机器人的尺寸（1.5 米）和重量（80 千克）变得与人类相似，还能做出优雅有力的类人动作，包括体操动作 [63] 和舞蹈 [64]。

波士顿动力公司（Boston Dynamics）所走的道路表明，要充分利用液压驱动所带来的好处，切入点是陡峭的，需要跨学科技术知识的协同作用。这项技术目前仍未商业化，这意味着任何有意使用液压系统的实体都将面临类似的问题。在美国国防部高级研究计划局机器人挑战赛（DRC）期间，多名参赛者使用了 ATLAS 平台，该平台非常坚固，数月内无需维护，但维修或升级必须由制造商自行完成，这阻碍了比赛的进展[65]。由于无法获得技术，再加上对技术的不熟悉和使用上的不便（噪音、泄漏），迄今为止建造的平台寥寥无几。最新的全尺寸人形机器人包括 Hydra [66] 和 TaeMu [67]，它们在驱动方案上有所不同。TaeMu 采用的是典型的中央泵方案，通过伺服阀调节整个机器人的压力，而 Hydra 采用的是 *电子静压致动器* (EHA)[68]，每个致动器都有自己的泵。Hydra 的解决方案结合了电动和液压致动器的优点：反向驱动性、抗冲击性、可控性和功率密度，但在尺寸和重量方面还有待优化。在液压系统中，油仍然通过柔性软管输送，这就降低了接头的活动性，时间长了还会导致泄漏。在机器人的结构部件中加入油路是可行的[69]，但必须在设计阶段完成，这就给设计过程增加了更多限制。如图所示，即使是上述几个人形机器人，其设计

和制造过程也需要定制解决方案。这可能反映了市场上可选方案的现状，更确切地说，是液压驱动机器人缺乏标准化和模块化的解决方案。

## 传感

与人类类似，类人猿也需要自我移动和环境感知的能力。多年来

目前已经开发并完善了多种传感技术。在人体定位方面,通常使用由加速计、陀螺仪和磁力计组成的惯性测量单元(IMU)。然后将读数融合,以提供完整的人体3D方向。结合身体平面模型和关节传感器,可以获得完整的6D自我运动估算。关节位置感应目前通常采用高分辨率、基于霍尔效应的磁性编码器。传感元件(如电位计)中没有摩擦力是一个巨大的优势,可减少维护需求。同样,可以通过测量施加到关节上的电流来估算扭矩或力,同时考虑传输损耗。结合雅各比,可以估算末端执行器扳手。这足以满足粗略操作的要求,但精细和详细的操作则有赖于精确的力-扭矩(F/T)传感器技术。正如ASIMO[8]所示,对于绝大多数应用(如开瓶或推车)而言,设计一个反馈回路以保持安全的力,并持续施加到被操纵物体上是必要的。在运动过程中,稳定性评估也是通过F/T传感器获得的压力中心(CoP)估计值来完成的。这就要求F/T传感器足够坚固,不仅能承受机器人的重量,还能在行走过程中承受地面冲击力。目前可用的F/T传感器的缺点是使用传感器(如应变片)进行测量,与通过传感器的力所引起的张力直接耦合。这也是造成长期变形(蠕变)和过载等问题的原因。重新校准可以延长传感器的使用寿命,而不像不可预知的冲击力造成的过载会直接毁坏传感器。新一代F/T传感器必须将力与张力分离,转而依赖非接触式位移[70][71],从而使传感器更加坚固耐用。

对于更复杂的多接触互动,通过F/T传感器或雅各布方法进行终端效应器扳手估算是不够的。人类通过皮肤与环境进行交互,皮肤可以感知各种物理量,如温度、湿度和预知温度。它可以区分不同类型的接触、接触的幅度以及通过毛发的近距离感应来预测接触。对全身机器人皮肤的需求非常明显[72],虽然机器人皮肤模块已经存在[73],但技术还不够成熟,无法与现有机器人无缝集成。这方面最先进的技术是HEX-o-SKIN[74,75],它将力传感器、温度传感器、

接近传感器和加速度传感器集成在一个廉价、可扩展且坚固的封装中。利用这些模块开发的各种应用[76-80]凸显了全身皮肤的重要性。全身皮肤

这对未来户外应用的人形机器人防水性能也至关重要。

## 制造业

机器人的制造材料和技术与所采用的技术同样重要。

为结构选择合适的材料会影响重量、刚度和维护方面的性能。如表 1 所示，金属合金是大多数人形机器人的默认选择，这是因为金属合金具有高刚性、可加工性和散热能力。为此，采用了减法制造（数控铣削）

或加法制造（铸造），各有利弊。iCub 人形机器人 [81] 就是采用减材制造工艺制造机器人的典型例子，该机器人的 5000 个零件绝大部分都是铣制的 [82]。由于切削工具必须能够执行编程路径，因此铣削加工可能实现的形状通常受到限制。五轴机床提供了最高的逼真度；然而，封闭部件和具有内部结构的部件仍需要由多个子部件组成。铸造可以部分缓解这一问题，但具体情况取决于零件的复杂程度。如 LOLA [83] 所示，通过铸造可以获得相当复杂的金属零件，否则就无法通过铣削加工实现，但需要为每个零件准备一个模具。在研究中，由于对数量的要求不高，这种方法的成本效益较低。最近，随着消费级三维打印机的普及和廉价，又多了一种提高生产能力的方法 [84]。三维打印技术可以快速生产高度复杂的零件，并轻松实现从原型到生产的过渡。在很短的时间内，人们就设计并制造出了多个不同尺寸的三维打印仿人机器人 [39, 40, 85-87]。三维打印所带来的自由度可以通过专家微调设计细节或算法加以利用。拓扑优化可以根据用户的标准（如重量、刚度），在形状和材料属性等约束条件下生成有效的形状 [83、88、89]。为打印准备设计文件时仍存在问题。由于采用的是增材制造工艺，零件的内部结构并不均匀，这与减材制造不同。这使得目前可用的 CAD 软件应力分析工具无法有效使用

，特别是对于基于沉积的打印。根据打印机的类型和质量，打印成品的精度可能会有很大差异。打印过程中的变量非常多，如使用的材料、温度、填充模式，甚至打印部件的方向。理想情况下，所设计的部件应与生产过

程脱节，而在 3D 打印过程中

然而，它们在很大程度上依赖于它。考虑到这些问题和所使用打印机的局限性，三维打印部件的原型制作主要是通过迭代完成的。虽然打印机的软件和硬件功能在不断改进，但沉积工艺仍然有限。就生产而言，使用选择性激光烧结（SLS）等更高质量的工艺可以进一步提高零件的质量，使其结构更坚固、更均匀。在生产出功能原型后，再进行小批量生产，这种工艺的成本效益相当高。除了这些基于聚合物的方法外，三维金属打印技术也已进入高级开发阶段[90]，有可能彻底改变机器人的生产方式。

除了简化生产过程，3D 打印技术还促进了研究机构之间的交流。开发和生产用于研究的仿人平台需要技术和资金资源。每制造一个新机器人，成本都会成倍增加，因为大多数部件都采用了定制和专有技术。使用标准的、现成的、市场上可买到的部件和开源设计，可以减轻开发和维护成本方面的问题[91]。获得一个 HUBO [15] 需要数十万美元，而类似大小的开源 NimbRo-OP2(X) [39, 40-, 92] 的材料费加起来还不到这个价格的 10%。开放式平台的基本功能自然不如成熟产品，但它们提供了一定程度的定制功能，可以充分利用。由于研究人员可以重复使用已开发的解决方案，因此不会面临 "重新发明轮子" 的问题。这样就可以将资源用于完善成熟设计的某些部分，而不是专注于克服制造完整机器人的最初障碍。通过将三维打印技术引入整个流程，机器人的生产和维护不再需要单独的机械车间来生产零部件。一台 3D 打印机不仅可以缩短生产时间，还可以完全减轻对零件制造商的依赖。破损的部件可以迅速得到改进、测试，并放到公共服务器上与其他用户共享，这将加速整个仿人机器人技术的发展。

## 结论

仿人机器人的硬件设计需要丰富的机电一体化知识和经验，才能制造出性能卓越的平台。我们介绍了当今

促进仿人机器人技术发展的最先进技术，以及将塑造其未来的新技术。传统的高刚性机器人正逐渐转向顺应性和动态机器人，以实现更安全的人机交互。

表 1 最近开发的具有完整仿人身体结构的双足仿人机器人

名称	高度 (厘米)	重量 (千克)	启动	执行器数量	传感	制造	年份	暂定价格
Curr Robot Rep								
阿西莫 (2011 型)	130	48	电动谐波驱动 液压系统	57	关节：位置 IMU、2x F/T、相机	镁合金 金属	2011	2500000 美元
阿特拉斯 (下一代)	150	75	伺服阀 液压伺服阀	28	关节：位置、力 激光雷达、立体视觉	3D 打印	2016	不适用
Atlas-Unplugged	188	182		30	关节：位置、力 激光 雷达、立体视觉	铝 钛	2015	2000000 美元
数字	155	42.2	电动摆线针轮 驱动器	16	关节：位置 IMU、激光雷达、4x 深度摄像头。	铝，铣削碳纤维	2019	250000 美元
HRP-5P	183	101	谐波电动滚筒	37	关节：位置 4x F/T、IMU、激光雷 达立体视觉	金属（未指定 ）	2018	不适用
水蛇	185	135	液压 EHA	41	关节：位置、力 IMU、2x F/T、激光雷达、立体声	铣削铝	2016	不适用
Kengoro	167	55.9	E 肌肉/肌腱	106	关节：位置、张力 IMU、 2x F/T、立体视觉	铝 3D 打 印	2016	不适用
NimbRo-OP2(X)	135	19	电动 直流伺服电机	34	关节：位置 IMU 、立体视觉	PA12 尼龙 3D 打印	2017	25000 欧元
塔洛斯	175	95	谐波电动滚筒	32	关节：位置、扭矩 IMU、RGBD 摄像头	金属（未指定 ）	2017	900000 欧元
托罗	174	76.4	谐波电动滚筒	39	关节：位置、扭矩 2x IMU、RGB&D 摄像机	铣削铝	2014	不适用
瓦尔基里	187	129	电动 SEA	44	关节：位置、力、扭矩 7x IMU、2xF/T、多个摄像头	金属（未指定 ）	2013	2000000 美元
行走的人	191	132	电动	29	关节：位置、扭矩	铣削铝	2015	不适用

人类和更高效的运动。ASIMO 的停产和 ATLAS 的大受欢迎就体现了这一点。波士顿动力公司 (Boston Dynamics) 为仿人机器人技术设定了前所未有的新标准,展示了打破典型设计模式所能达到的效果。随着快速原型技术的普及,现在比以往任何时候都能制造出更多的全尺寸仿人机器人。未来的仿人机器人将如何利用所有的技术进步,以及它们可以应用于哪些实际任务,这将是一个令人兴奋的话题。

**资金来源** 由 Projekt DEAL 提供和组织的开放式获取资金。

## 声明

**人与动物的权利和知情同意** 本文不包含任何作者进行的以人或动物为对象的研究。

**利益冲突** 作者声明不存在利益冲突。

**开放存取** 本文采用知识共享署名 4.0 国际许可协议进行许可,该协议允许以任何媒介或格式使用、共享、改编、分发和复制本文,但需适当注明原作者和出处,提供知识共享许可协议的链接,并说明是否进行了修改。本文中的图片或其他第三方材料均包含在文章的知识共享许可协议中,除非在材料的署名栏中另有说明。如果材料未包含在文章的知识共享许可协议中,且您打算使用的材料不符合法律规定或超出许可使用范围,您需要直接从版权所有处获得许可。要查看该许可的副本,请访问 <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>。

## 参考资料

最近发表的特别值得关注的论文有

- 重要性
- 具有重大意义

1. Behnke S. 人形机器人--从虚构走向现实? KI.2008;22(4):5-9.
2. Froese R. 立方体定律、条件因子和体重-长度关系: 历史、荟萃分析和建议。J Appl Ichthyol.2006;22(4):241-253.
3. Usherwood J, Gladman N. 《为什么最快的跑步者都是 中等身材? 机械需求和肌肉供功与供力的对比比例。Biol Lett.
4. Shin H, Ishikawa T, Kamioka T, Hosoda K, Yoshiike T. 基于

弹簧加载倒立摆的腿部结构五杆并联机构的机械特性。In: 2019 IEEE-RAS 19th International conference on humanoid robots (Humanoids).IEEE; 2019. p. 320-327.

5. Playter R, Raibert MH.三维双足筋斗控制。In: IEEE/RSJ 智能机器人与系统国际会议论文集》。IEEE.; 1992. p. 582-589.



6. Hubicki C, Grimes J, Jones M, Renjewski D, Sprowitz A, Abate A, et al. Atrias: design and validation of a tether- free 3d-capable spring-mass bipedal robot. *Int J Robot Res*. 2016;35(12):1497-1521.
7. Abate AM.《机器人运动的机械设计》。2018.
8. 本田公司的 ASIMO 和仿人机器人研究。仿人机器人: A Reference. p.55-90.2018.
9. Yokoi K, Kanehiro F, Kaneko K, Kajita S, Fujiwara K, Hirukawa H. Humanoid Robot HRP-1S 的实验研究. *Int J Robot Res*. 2004.
10. Hirukawa H, Kanehiro F, Kaneko K, Kajita S, Fujiwara K, Kawai Y, et al. HRP 开发的仿人机器人平台. *Rob Auton Syst*. 2004.
11. Kaneko K, Harada K, Kanehiro F, Miyamori G, Akachi K. 人形机器人 HRP-3. In: IEEE/RSJ 智能机器人与系统国际会议 (IROS) ; 2008 年.
12. Kaneko K, Kanehiro F, Morisawa M, Akachi K, Miyamori G, Hayashi A 等人形机器人 HRP-4--具有轻质纤薄机身的人形机器人平台. In: IEEE/RSJ 智能机器人与系统 (IROS) 国际会议.
13. Kaneko K, Kanehiro F, Morisawa M, Miura K, Nakaoka S, Kajita S. Cybernetic Human HRP-4C. In: Proceedings of 9th IEEE-RAS Int. 仿人机器人 (Humanoids) 研讨会, 2009 年; 第 7-14 页.
14. Kaneko K, Kaminaga H, Sakaguchi T, Kajita S, Morisawa M, Kumagai I, et al. 人形机器人 HRP-5P: 具有高功率和宽范围关节的电动仿人机器人. *IEEE Robot Autom Lett*.
15. Park IW, Kim JY, Lee J, Oh JH. 仿人机器人平台 HUBO 的机械设计. *Adv Robot*. 2007;21(11):1305-1322.
16. 机器人 P. Reem-c. Data de consulta. 18. 2015.
17. Stasse O, Flayols T, Budhiraja R, Giraud-Esclasse K, Carpentier J, Mirabel J. TALOS: 面向工业应用的新型仿人研究平台。 In: 2017 IEEE- RAS 17th International conference on humanoid robotics (Humanoids). IEEE; 2017. p. 689-695.
18. Tolani D, Goswami A, Badler NI. 拟人肢体的实时逆运动学技术. *Graph Models*. 2000;62(5):353-388.
19. Hirose M, Ogawa K. Honda humanoid robots development. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*.
20. Ceccarelli M, Russo M, Morales-Cruz C. Parallel architectures for humanoid robots. *Robotics*. 2020;9(4):75.
21. Tazaki Y. 基于并行链接的双足机器人轻量腿设计. In: 2019 IEEE-RAS 19th International conference on humanoid robots (Humanoids). IEEE; 2019. p. 565-571.
22. Lee B, Knabe C, Orekhov V, Hong D. Design of a human-like range of motion hip joint for humanoid robots. In: ASME 2014 国际设计工程技术会议和工程中的计算机与信息会议. 美国机械工程师学会数字集; 2014 年.
23. Mghames S, Catalano MG, Bicchi A, Grioli G. A spherical active joint for humanoids and humans. *IEEE Robot Autom Lett*.
24. Lahr D, Orekhov V, Lee B, Hong D. 平行驱动仿人机器人 SAFFiR 的早期开发. In: ASME 2013 国际设计工程技术会议和工程中的计算机与信息会议. 美国机械工程师学会数字集; 2013 年.

25. Kakiuchi Y, Kamon M, Shimomura N, Yukizaki S, Takasugi N, Nozawa S, et al. 开发具有摔倒、长时间工作和错误发生鲁棒性的真人大小仿人机器人平台。In: 2017 IEEE/RSJ International conference on intelligent robots and systems (IROS).IEEE; 2017. p. 689-696.
26. Negrello F, Garabini M, Catalano MG, Kryczka P, Choi W, Caldwell DG, et al. Walk-man 人形下半身设计优化以增强体能。2016.In: IEEE 机器人与自动化国际会议 (ICRA) 。 IEEE; 2016. p. 1817-1824.
27. Kamioka T, Kaneko H, Kuroda M, Tanaka C, Shirokura S, Takeda M, et al. 步行、跑步和跳跃之间动态步态转换的推动恢复策略。Int J Human Robot.2019;16(03):1940001.
28. Lohmeier S, Buschmann T, Schwienbacher M, Ulbrich H, Pfeiffer F. 仿人行走机器人的腿部设计。In: 2006 6th IEEE-RAS International conference on humanoid robots.IEEE; 2006. p. 536-541.
29. Tomishiro K, Sato R, Harada Y, Ming A, Meng F, Liu H, et al.In: 2019 IEEE/RSJ International conference on intelligent robots and systems (IROS).IEEE; 2019. p. 4333-4338.
30. 本田汽车有限公司有腿移动机器人; 专利 JP 2013- 94943 A. 2013.
31. Engelsberger J、Werner A、Ott C、Henze B、Roa MA、Garofalo G 等人. 扭矩控制仿人机器人 TORO 概述。In: 2014 IEEE-RAS International conference on humanoid robots.IEEE; 2014. p. 916-923.
32. Zhou C, Tsagarakis N. 论仿人平行踝机构的综合运动学分析。J Mech Robot.2018;10(5).
33. Hancock PJ.新型 3D 打印仿人腿的自适应扭矩控制。弗吉尼亚理工大学。2020.
34. Otani T、Iizuka A、Takamoto D、Motohashi H、Kishi T、Kryczka P 等: 仿人机器人在水平面和正面模仿人类行走的新柄机构。In: 2013 IEEE international conference on robotics and automation.IEEE; 2013. p. 667-672.
35. Gim KG, Kim J, Yamane K. 人形机器人串并联混合腿的设计。In: 2018 IEEE International conference on robotics and automation (ICRA).IEEE; 2018. p.6076-6081.
36. Gim KG, Kim J, Yamane K. 使用串并联混合腿机构的双足机器人的设计与制造。In: 2018 IEEE/RSJ International conference on intelligent robots and systems (IROS).IEEE; 2018. p. 5095-5100.
37. Robotis Ltd.Robotis op3; 2021.Available from: <https://emanual.robotis.com/docs/en/platform/op3/introduction/>.
38. Kajita S, Kanehiro F, Kaneko K, Yokoi K, Hirukawa H. 三维线性倒立摆模式: 双足行走模式生成的简单建模。In: Proceedings 2001 IEEE/RSJ International conference on intelligent robots and systems.Expanding the societal role of robotics in the next millennium (Cat. No. 01CH37180).IEEE; 2001. p. 239-246.
39. Ficht G, Allgeuer P, Farazi H, Behnke S. NimbRo-OP2: 用于研究的长大 3D 打印开放式仿人平台。In: 2017 IEEE-RAS 17th International conference on humanoid robotics (Humanoids).IEEE; 2017. p. 669-675.
40. - Ficht G, Farazi H, Brandenburger A, Rodriguez D, Pavlichenko D, Allgeuer P, et al. NimbRo-OP2X: Adult-sized open-source 3D printed humanoid robot.In: 2018 IEEE-RAS 18th International conference on humanoid robots (Humanoids).IEEE; 2018. p. 1-9.本文提供了

41. Saab W, Rone WS, Ben-Tzvi P. Robotic modular leg: design, analysis, and experimentation. *J Mech Robot.* 2017;9(2).
42. Han J, Hong D. 利用弹簧辅助平行四杆连杆同步驱动的全尺寸双足仿人机器人的开发。In: p. 799-806.
43. Sharbafi MA、Rode C、Kurowski S、Scholz D、Möckel R、Radkhah K 等: 新型生物关节致动器设计有助于控制 BioBiped3 的腿部功能。 *Bioinspir Biomim.* 2016;11(4):046003.
44. Roozing W、Ren Z、Tsagarakis NG。具有串并联和生物关节顺应性驱动的高效腿: eLeg 的设计优化、建模和控制。 *Int J Robot Res.* 2019:0278364919893762.
45. - Schumacher C、Sharbafi M、Seyfarth A、Rode C。从模板模型、实验和机器人技术看生物关节肌肉: 综述。 *J Roy Soc Interface.* 2020;17(163):20180413。 **本研究基于人类数据、分段模板模型和选定的机器人, 全面概述了生物关节如何影响双足运动。**
46. Schu"tz S, Nejadfard A, Mianowski K, Vonwirth P, Berns K. CARL-A compliant robotic leg featuring mono-and biarticular actuation. In: 2017 IEEE-RAS 17th International conference on humanoid robotics (Humanoids).IEEE; 2017. p.289-296.
47. Ananthanarayanan A, Azadi M, Kim S. Towards a bio-inspired leg design for high-speed running. *Bioinspir Biomim.* 2012;7(4):046005.
48. Feldmann S、Bruckmann T、Schramm D. 仿真机器人原型电缆驱动致动概念。In: 2014 IEEE/ASME 10th International conference on mechatronic and embedded systems and applications (MESA). IEEE; 2014. p. 1-6. *Curr Robot Rep.* 2014. p. 1-6.
49. Nakanishi Y、Asano Y、Kozuki T、Mizoguchi H、Motegi Y、Osada M 等. 肌肉骨骼仿人机器人 Kenshiro 的细节设计理念-- 面向真实人体肌肉骨骼模拟器。In: 2012 12th IEEE-RAS International conference on humanoid robots (Humanoids 2012).IEEE; 2012. p. 1-6.
50. Asano Y, Kozuki T, Ookubo S, Kawamura M, Nakashima S, Katayama T, et al. Human mimetic musculoskeletal humanoid Kengoro toward real world physically interactive actions. In: 2016 IEEE-RAS 16th International conference on humanoid robots (Humanoids).IEEE; 2016. p. 876-883.
51. Radford NA, Strawser P, Hambuchen K, Mehling JS, Verdeyen WK, Donnan AS, et al. Valkyrie: Nasa's first bipedal humanoid robot. *J Field Robot.* 2015;32(3):397-419.
52. Tsagarakis NG, Caldwell DG, Negrello F, Choi W, Baccelliere L, Loc VG, et al. Walk-man: a high-performance humanoid platform for realistic environments. *J Field Robot.* 2017;34(7):1225-1259.
53. Negrello F、Garabini M、Catalano MG、Malzahn J、Caldwell DG、Bicchi A 等: 面向新兴高性能抗摔仿人机器人的模块化顺从致动器。In: 2015 IEEE-RAS 15th International conference on humanoid robots (Humanoids).IEEE; 2015. p. 414-420.
54. Martins LT、Tatsch C、Maciel EH、Henriques RVB、Gerndt R、da Guerra RS. 机器人致动器的聚氨酯模块化系列弹性升级。In : 机器人足球世界杯; 2015 年。第 347-355 页。
55. - Katz BG. 用于动态机器人的低成本模块化致动器。麻省理工学院。2018. **本论文**

# **为结构紧凑、功能强大的 QDD 执行器提供了设计模板。**

56. Katz B, Di Carlo J, Kim S. Mini Cheetah: a platform for pushing the limits of dynamic quadruped control.In: 2019 International conference on robotics and automation (ICRA).IEEE; 2019. p. 6295-6301.
57. Ramos J, Katz B, Chuah MYM, Kim S.通过软硬件协同设计促进基于模型的控制2018.In: IEEE 机器人与自动化国际会议 (ICRA) 。 IEEE; 2018. p. 566-572.
58. Kato I, Ohteru S, Kobayashi H, Shirai K, Uchiyama A. 具有感官和四肢的信息动力机。 In: 《论机器人和机械手的理论与实践》。 Springer; 1974. p.11-24.
59. 波士顿动力公司 。 网 址 : <https://www.bostondynamics.com/>; 2021.
60. Nelson G, Saunders A, Neville N, Swilling B, Bondaryk J, Billings D, et al. Petman: A humanoid robot for testing chemical protective clothing.J Robot Soc Jpn.2012;30(4):372-377.
61. Nelson G, Saunders A, Playter R. The petman and atlas robots at boston dynamics.仿人机器人：参考资料》。 p.169-186.2019.
62. 波士顿动力公司 。 网 址 : <https://www.youtube.com/watch?v=rVlhMGQgDkY>。 2016.
63. 波士顿动力公司更多跑酷图集。 2019.Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=sBBaNYex3E>.
64. 波士顿动力你爱我吗？ 2020. 可 登 录 <https://www.youtube.com/watch?v=fn3KWM1kuAw>。
65. Johnson M, Shrewsbury B, Bertrand S, Calvert D, Wu T, Duran D, et al. IHMC 团队从 DARPA 机器人挑战赛中吸取的经验教训：在废墟中寻找数据。 J Field Robot.2017;34(2):241-261.
66. Kaminaga H, Ko T, Masumura R, Komagata M, Sato S, Yorita S, et al. 全身静电致动器驱动仿人机器人水螅的机制与控制。 In: 实验机器人国际研讨会。 Springer; 2016. p. 656-665.
67. Hyon SH, Suewaka D, Torii Y, Oku N. 快速扭矩控制液压仿人机器人的设计与实验评估。 IEEE/ASME Trans Mechatron.2016;22(2):623-634.
68. Kaminaga H, Otsuki S, Nakamura Y. 高功率、可反向驱动的线性静电致动器的开发。 In: 2014 IEEE-RAS International conference on humanoid robots.IEEE; 2014. p. 973-978.
69. Li X, Zhou H, Zhang S, Feng H, Fu Y.WLR-II 无软管液压轮足机器人。 In: 2019 IEEE/RSJ International conference on intelligent robots and systems (IROS).IEEE; 2019. p. 4339-4346.
70. Kim U, Lee DH, Kim YB, Seok DY, Choi HR.用于机器人应用的新型六轴力/扭矩传感器。 IEEE/ASME Trans Mechatron.2016;22(3):1381-1391.
71. Noh Y、Bimbo J、Sareh S、Wurdemann H、Fras´ J、Chathuranga DS 等：基于简支梁和光电子技术的多轴力/扭矩传感器。传感器。 2016;16(11):1936.
72. Atkeson CG, Babu B, Banerjee N, Berenson D, Bove C, Cui X, et al. What happened at the darpa robotics challenge, and why. 提交给《现场机器人学杂志》的 DRC 决赛特刊。 2016.
73. Zou L, Ge C, Wang ZJ, Cretu E, Li X.新型触觉传感器技术和智能触觉传感系统：综述。 Sensors.2017;17(11):2653.
74. Mittendorfer P, Cheng G. Humanoid multimodal tactile-sensing modules.IEEE Trans Robot.2011;27(3):401-410.
75. Mittendorfer P, Cheng G. 将离散力细胞集成到多模式人造皮肤中。 In: 2012 12th IEEE-RAS

- 仿人机器人国际会议 (Humanoids 2012)。IEEE, 2012. p. 847-852.
76. Mittendorf P, Yoshida E, Cheng G. 利用仿人机器人上的自组织多模式人造皮肤实现全身触觉交互。Adv Robot.2015;29(1):51-67.
  77. Kaboli M, Feng D, Cheng G. 使用多模态机器人皮肤在非结构化环境中进行主动触觉转移学习以辨别物体。Int J Hum Robot.2018;15(01):1850001.
  78. Leboutet Q、Dean-Leon E、Bergner F、Cheng G. 基于触觉的移动机械手全身顺应性与力传播。IEEE Trans Robot.2019;35(2):330-342.
  79. Kobayashi T、Dean-Leon E、Guadarrama-Olvera JR、Bergner F、Cheng G. 物理人机交互过程中的多触点力反应行走控制。In: 2019 IEEE- RAS 19th international conference on humanoid robots (Humanoids).IEEE; 2019. p. 33-39.
  80. - Rogelio Guadarrama Olvera J、Leon ED、Bergner F、Cheng G. 未知地形上双足平衡和运动的足底触觉反馈。Int J Hum Robot.2020;17(01):1950036. **与通常使用的力-力矩传感器相比, 这项研究显示了机器人皮肤在障碍物上平衡行走时获得的额外模式的效果。**
  81. Parmiggiani A, Maggiali M, Natale L, Nori F, Schmitz A, Tsagarakis N, et al. iCub 人形机器人的设计。Int J Hum Robot.2012;9(04):1250027.
  82. Metta G, Natale L, Nori F, Sandini G, Vernon D, Fadiga L, et al. iCub 人形机器人: 认知发展研究的开放系统平台。神经网络》, 2010; 23 (8- 9) : 1125-1134。
  83. 人形机器人 LOLA。In: 2009 IEEE International conference on robotics and automation.IEEE; 2009. p. 775-780.
  84. Jones R, Haufe P, Sells E, Iravani P, Olliver V, Palmer C, et al. RepRap-- 可复制的快速原型机。Robotica.2011;29(1):177-191.
  85. Lapeyre M, Rouanet P, Grizou J, Nguyen S, Depraetre F, Le Falher A, et al. Poppy project: Open-source fabrication of 3D printed humanoid robot for science, education and art.Digit Intell.2014;2014:6.
  86. Allgeuer P, Farazi H, Schreiber M, Behnke S. 儿童大小的3D 打印 igus 人形开放平台。In: 2015 IEEE/RSJ 15th International conference on humanoid robots (Humanoids).IEEE; 2015. p. 33-40.
  87. Wu L、Larkin M、Potnuru A、Tadesse Y. HBS-1: 模块化儿童尺寸 3D 打印仿人机器人。Robotics.2016;5(1):1.
  88. Junk S、Klerch B、Hochberg U.仿人机器人拓扑优化轻质部件的快速成型制造。In: Sim-AM 2019: 第二届增材制造模拟国际会议。CIMNE; 2019. p. 142-153.
  89. Klemm V, Morra A, Salzmann C, Tschopp F, Bodie K, Gulich L, et al. Ascento: a two-wheeled jumping robot.In: 2019 International conference on robotics and automation (ICRA).IEEE; 2019. p. 7515-7521.
  90. Buchanan C, Gardner L. 建筑中的金属三维打印: 方法、研究、应用、机遇与挑战综述。Eng Struct.2019;180:332-348.
  91. Allgeuer P, Farazi H, Ficht G, Schreiber M, Behnke S. The igus humanoid open platform.KI-Ku",nstliche Intelligenz.2016;30(3):315-319.
  92. Ficht G、Farazi H、Rodriguez D、Pavlichenko D、Allgeuer P、Brandenburger A 等人. NimbRO-OP2X: 用于研究的经济型成人尺寸 3d 打印开源仿人机器人。Int J Hum Robot.2020;17(05):2050021.

**出版商注释** 施普林格-自然对出版地图中的管辖权主张和机构隶属关系保持中立。