



德邦证券
Topsperity Securities

证券研究报告 | 行业研究

2024年2月1日

双足人形机器人腿部设计 原则与构型分类解析

证券分析师

姓名：陆强易

资格编号：S0120523110001

邮箱：luqy3@tebon.com.cn

研究助理

姓名：完颜尚文

邮箱：wanyansw@tebon.com.cn

更多免费行业报告

并购家

www.ipopo.cn

并购家 免费行业报告网

IPOIPO.CN 每日更新 不用注册会员 无广告 永久免费

- 腿部设计的重要性：影响双足机器人运动性能，仍有提升空间
- 腿部构型设计准则：高总质心、低惯量、低质量、高刚性
- 6自由度“人腿”方案：双足机器人最常见的腿部设定
- 创新腿方案：“鸟腿”和合成腿相较“人腿”存在独特优势

01

腿部设计的重要性：

影响双足机器人运动性能，仍有提升空间

双足机器人能够直接适配人类环境，但运动能力有待提升



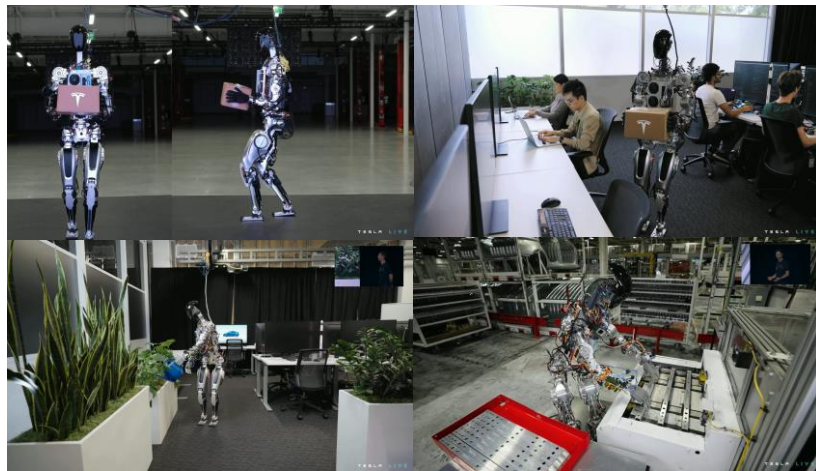
德邦证券
Topsperity Securities

- ❑ 双足机器人具有众多优势，应用场景广阔。众多优势包括：1) 地面适应性好、能耗小、工作空间大、能够实现双足行走；2) 能够直接适配人类环境，不需要为了适应机器人而进行改造；3) 拥有类人的外形，更容易被人类接受。应用场景包括：面向恶劣条件、危险场景作业的服务特种领域，3C、汽车等制造业重点领域，医疗、家政等民生领域。
- ❑ 由于技术限制，双足机器人腿部尚未达到人类骨骼肌肉的运动能力水平。目前，双足机器人还没有全面达到人类的运动和感知能力，因此还没有一款双足机器人能够真正走入人类生活。

图表：双足机器人拥有类人外形



图表：双足机器人地面适应性好，具有广泛的应用场景



资料来源：Grzegorz Ficht et al. *Bipedal Humanoid Hardware Design: a Technology Review*, 德邦研究所

资料来源：Tesla AI Day 2022, youtube 特斯拉官方账号, 德邦研究所

更多免费行业报告

并购家

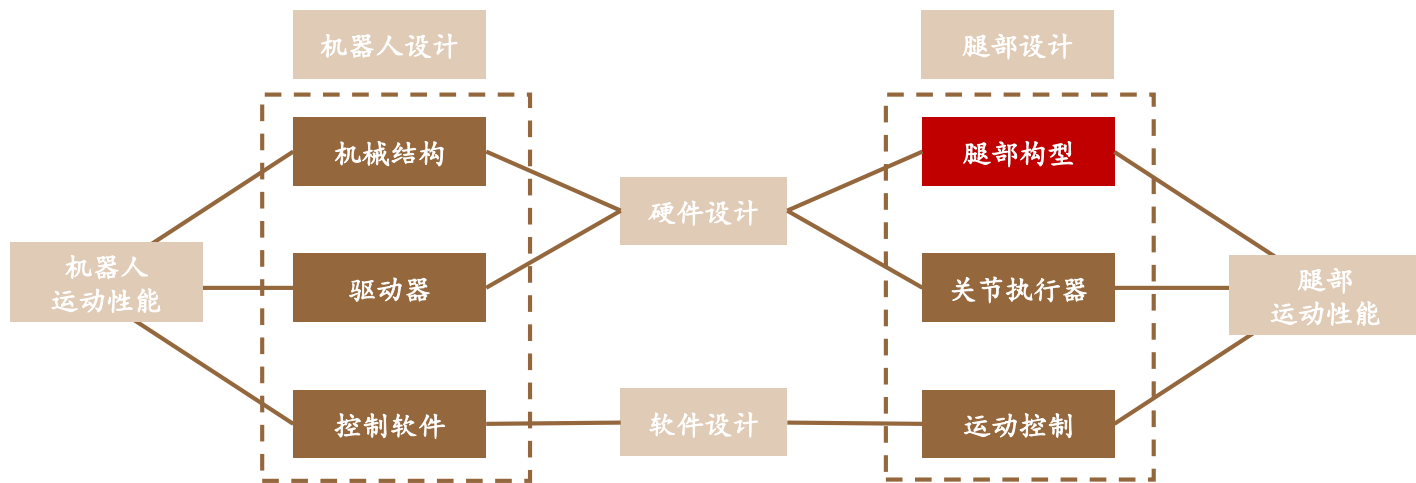
www.ipopo.cn



腿部构型影响双足机器人的运动性能

- 腿部设计包括腿部构型、关节执行器硬件设计和运动控制软件设计，三者共同影响机器人的运动性能。
- 腿部构型设计是双足机器人设计的关键一环，应与软件优化升级同步进行。控制软件可以一定程度上补偿机械结构的缺陷，因此机械结构在机器人设计中常被忽视。但许多系统性能缺陷根源在于不良的机械结构。双足机器人没有全面达到人类的运动能力，是因为机器人的腿部构型和驱动形式没有达到人类骨骼肌肉的运动能力水平，因此控制软件与机械结构、机械部件的优化升级应同步进行。

图表：腿部构型设计影响双足机器人的运动性能



资料来源：丁宏钰《双足机器人腿部及其驱动器的设计理论与关键技术研究》，Kenji Hashimoto *Mechanics of humanoid robot*，德邦研究所绘制

02

腿部构型设计准则：

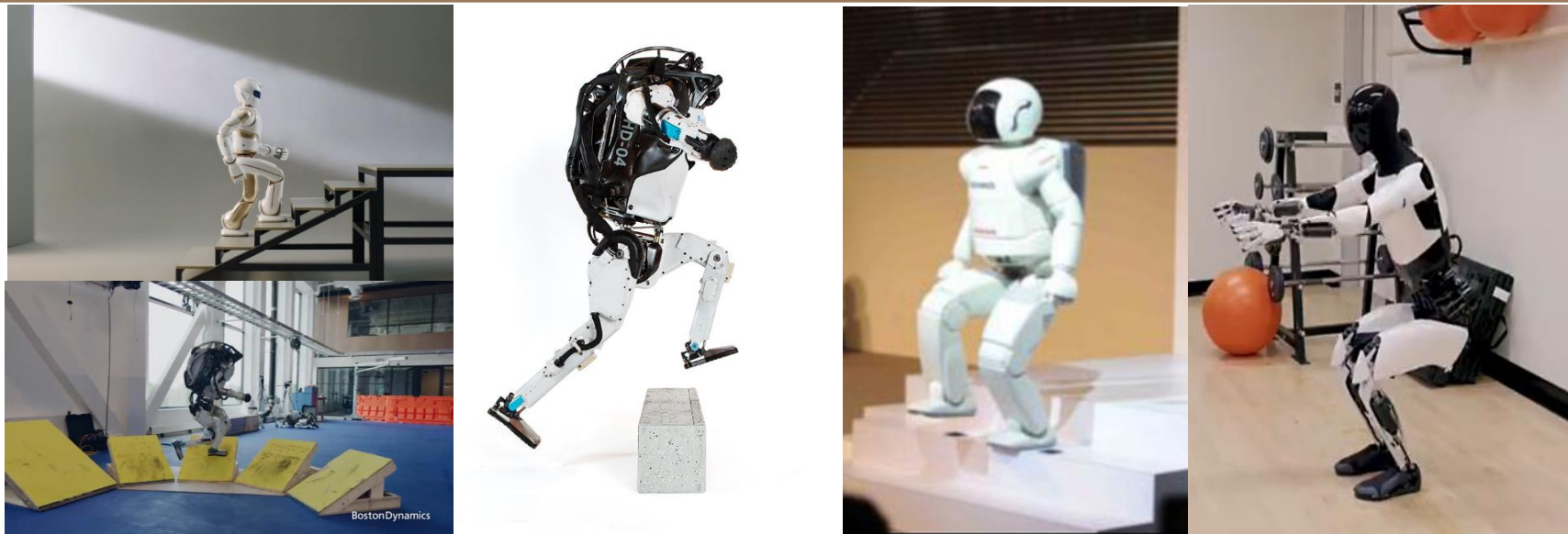
高总质心、低惯量、低质量、高刚性



设计总要求：提高双足机器人腿部高动态响应能力

- 双足机器人腿部设计应遵循提高腿部高动态响应能力的总要求。人类设计双足机器人的目的是为人类提供服务，把人类从简单重复或危险繁重的工作中解脱出来，对双足机器人提出了以下要求：1) 适应人类生存的环境如不平整路面、楼梯、斜坡路等；2) 能够完成行走、蹲起、爬起等复杂动作。适应复杂路况和执行复杂动作需要机器人腿部具有高的动态响应能力。

图表：双足机器人腿部设计应遵循提高腿部高动态响应能力的总要求



资料来源：深圳商报，河马机器人官网，凤凰网，本田中国官网，澎湃新闻，德邦研究所

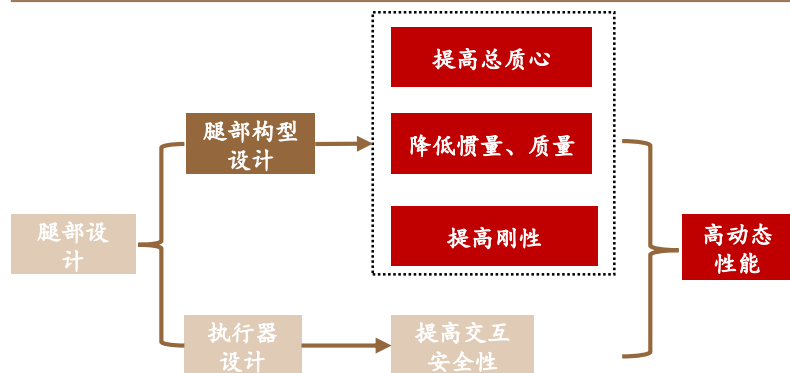
腿部构型设计准则：高总质心、低惯量、低质量、高刚性



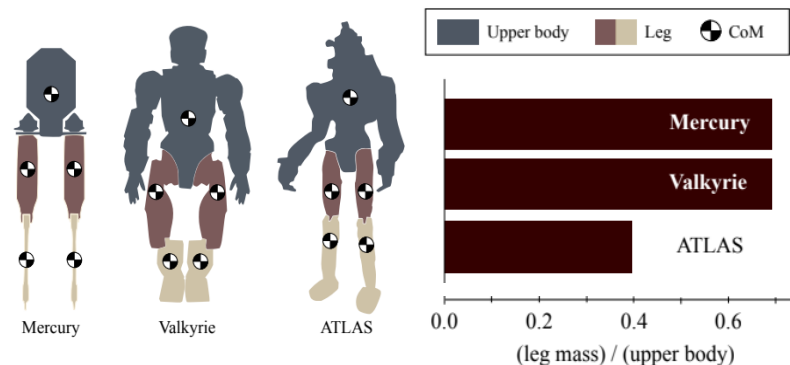
德邦证券
Topsperity Securities

- **提高机器人总质心。**与人类不同，传统双足机器人质量的较大部分集中在腿部，且电机和减速器占了机器人整体质量的 40%左右，导致机器人的总质心处于机身较低位置。在机器人总高和质量不变的情况下，机器人横向摆动随着总质心高度的增加而减少，提高总质心进而减少横向摆动以提高机器人在较高行走速度下的稳定性。
- **降低腿部惯量和质量。**一方面，降低腿部惯量和质量有利于提高机器人的行走速度和行走稳定性；另一方面，降低腿部能量消耗。
- **提高腿部刚性。**如果机器人腿部刚性不足，就会导致机器人行走过程中足部相对于规划过早接触地面，影响机器人高速行走稳定性；高刚性腿部设计的模型误差更低；高刚性腿不容易在动态行走过程中发生变形。

图表：腿部构型设计要把握高总质心、低惯量、低质量、高刚性的准则



图表：与人体不同，传统双足机器人质心一般在腿部或盆骨处



资料来源：丁宏钰《双足机器人腿部及其驱动器的设计理论与关键技术研究》，德邦研究所绘制

资料来源：Donghyun Kim et al. *Dynamic Locomotion For Passive-Ankle Biped Robots And Humanside Using Whole-Body Locomotion Control*，德邦研究所

03

6自由度“人腿”方案：

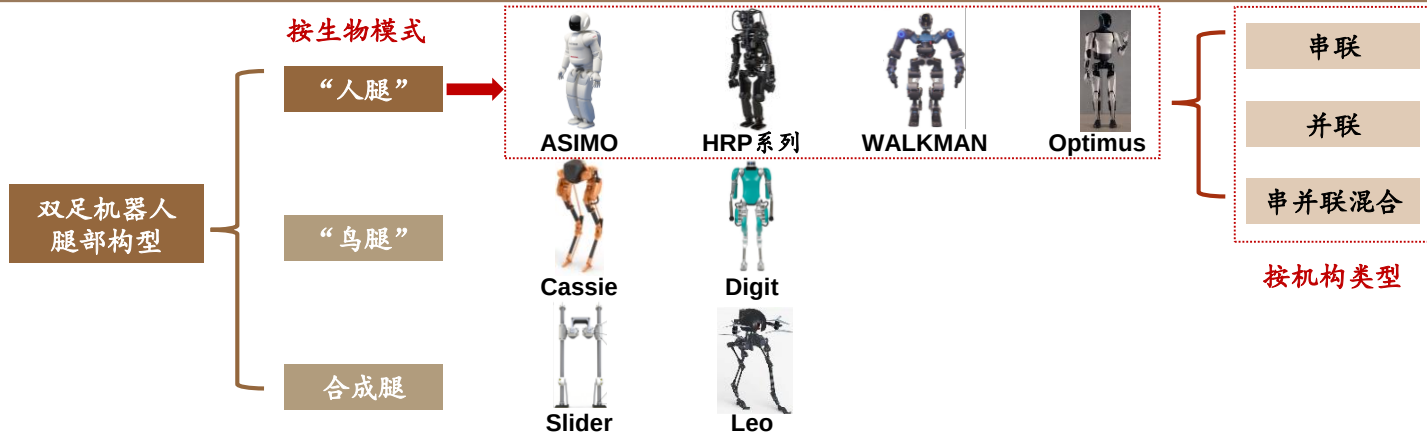
双足机器人最常见的腿部设定



双足机器人腿部构型分类概览

- 按生物学模式，双足机器人腿部设计可分为“人腿”、“鸟腿”和合成腿，大多数双足机器人采用人腿方案。“人腿”和“鸟腿”均为生物启发式腿部构型方案，即腿部构型符合人腿构型或鸟腿构型。绝大多数腿部构型采用人腿方案（ASIMO、HRP系列、WALKMAN、Optimus等），少数双足机器人采用鸟腿（Cassie和Digit）和合成腿（Slider和Leo）。
- 按选用的机构类型将“人腿”构型进一步分为串联、并联和串并联混合三种类型。人腿方案差异体现在基于不同位置关节特点或腿部整体的考虑，选用不同的机构对关节进行排布。绝大多数双足机器人基于髋关节、膝关节和踝关节各自的特点分别进行机构的设计，少数基于腿部整体对关节进行排布（Gim et al., 2018）。

图表：双足机器人腿部构型分类概览



资料来源：Tadeusz Mikolajczyk et al. *Recent Advances in Bipedal Walking Robots: Review of Gait, Drive, Sensors and Control Systems*, Grzegorz Ficht et al. *Bipedal Humanoid Hardware Design: a Technology Review* 德邦研究所绘制

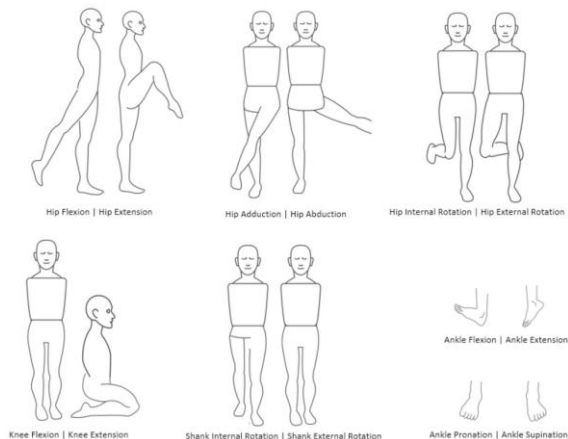
“人腿”自由度分布：髋关节3DOF+膝关节1DOF+踝关节2DOF



德邦证券
Topsperity Securities

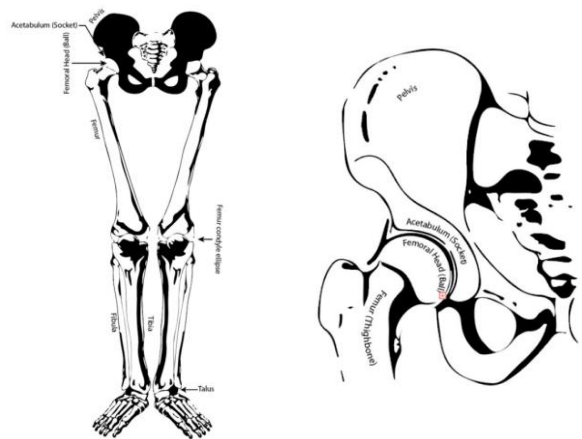
- 人体/机器人机构能够独立运动的关节数目，称为运动自由度，简称自由度（Degree of Freedom / DOF）。机器人的自由度越多，运动越灵活、通用性越好，但结构更加复杂，对机器人设计和控制要求更高。机器人机构自由度的选择需要平衡运动性能和机构的复杂性。
- 人体下半身共有8个自由度，其中7个为主动自由度：1）髋关节。三个自由度（髋关节外展-内收、屈曲-伸展、内-外旋转）；2）膝关节。两个自由度（膝关节屈曲-伸展、小腿内-外旋转）；3）踝关节。两个自由度（屈曲-伸展、旋前-旋后）。此外，还有1个被动自由度：膝关节的线位移。

图表：人体下半身共有8个自由度，其中7个为主动自由度



资料来源：SK Hasan et al. 8 Degrees of freedom human lower extremity kinematic and dynamic model development and control for exoskeleton robot based physical therapy, 德邦研究所

图表：人体下肢骨骼与髋关节球窝结构



资料来源：SK Hasan et al. 8 Degrees of freedom human lower extremity kinematic and dynamic model development and control for exoskeleton robot based physical therapy, 德邦研究所

“人腿”自由度分布：髋关节3DOF+膝关节1DOF+踝关节2DOF



德邦证券
Topsperity Securities

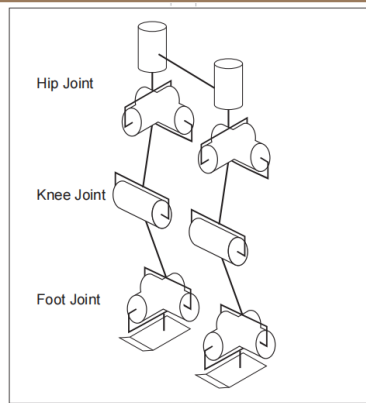
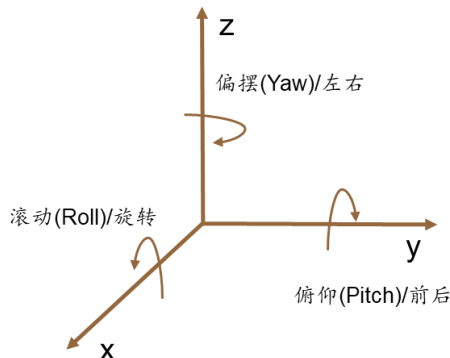
- 双足机器人腿部设计常选用旋转关节，一个关节仅有一个自由度。运动学设计中常见的3种关节类型分别为直线（prismatic）、旋转（revolute）和球形（spherical）关节：线性或棱柱形关节可以沿单个轴进行平移或滑动运动；旋转关节围绕一个自由度的点运动；球形关节可以围绕一个点在多个自由度上移动，但其控制较为复杂，通常用3个旋转关节代替。若无特别说明，本报告中的关节一般指旋转关节。
- 双足机器人单腿自由度通常为6个。人体单腿自由度为8个，对于机器人而言，单腿6自由度即可实现与人腿近似的形态和功能，大多数双足机器人采用6自由度人腿方案。其中髋关节通常有3个自由度，分别控制关节滚动、俯仰、偏摆运动；膝关节只有1个俯仰自由度；踝关节有滚动、俯仰2个自由度。

图表：大多数双足机器人采用6自由度人腿方案

关节部位	人体自由度	机器人自由度	机器人关节运动
髋关节	3	3	滚动、俯仰、偏摆
膝关节	3	1	俯仰
踝关节	2	2	滚动、俯仰

资料来源：SK Hasan et al. 8 Degrees of freedom human lower extremity kinematic and dynamic model development and control for exoskeleton robot based physical therapy, Grzegorz Ficht et al. Bipedal Humanoid Hardware Design: a Technology Review, 石照耀《双足机器人腿部新构型设计

图表：大多数双足机器人腿部构造基于人腿设计



资料来源：Sebastian Lohmeier et al. Humanoid robot LOLA, Asimo technical information, 德邦研究所

“人腿”构型分为串、并联及串并联混合三种类型



德邦证券
Topsperity Securities

□ 双足机器人腿部设计可采用三种机构：串联、并联和串并联混合机构，以此作为人腿整体构型的分类依据。

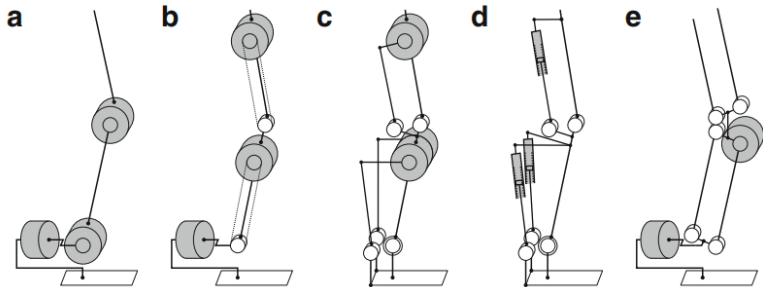
- 1) 串联机构 (a、b)：由多个连杆通过运动副（关节/铰链）以串联的形式连接成首尾不封闭的机构，每个关节由其驱动器独立驱动；结构简单、易于控制、工作空间大，但其定位精度较低、惯量大、刚度低，动力学性能较差，与腿部设计准则相背离。
- 2) 并联机构 (c、d)：多个连杆首尾连接形成封闭的机构；最大的优势在于可以将腿部执行器上移以此减小腿部惯量，定位精度、刚度、负载能力都能得到提高，但要以机构复杂程度、控制难度增加为代价。
- 3) 串并联混合机构 (e)：同时采用串联和并联两种机构，结合串联和并联两者的优势，但缺点是机构复杂性和控制难度进一步增加。

图表：串联结构简单、好控制；并联机构利于减小腿部惯量、提高刚度

性能	串联机构	并联机构
工作空间	大	小
定位精度	积累/低	平均/高
惯量	大	小
刚度	低	高
负载	小	大
结构/控制复杂程度	简单	困难

资料来源：Mitsuharu Morisawa et al. A Comparison Study between Parallel and Serial Linked Structures in Biped Robot System, Kenji Hashimoto Mechanics of humanoid robot, 德邦研究所

图表：双足机器人腿部设计可采用串联、并联和串并联混合三种机构

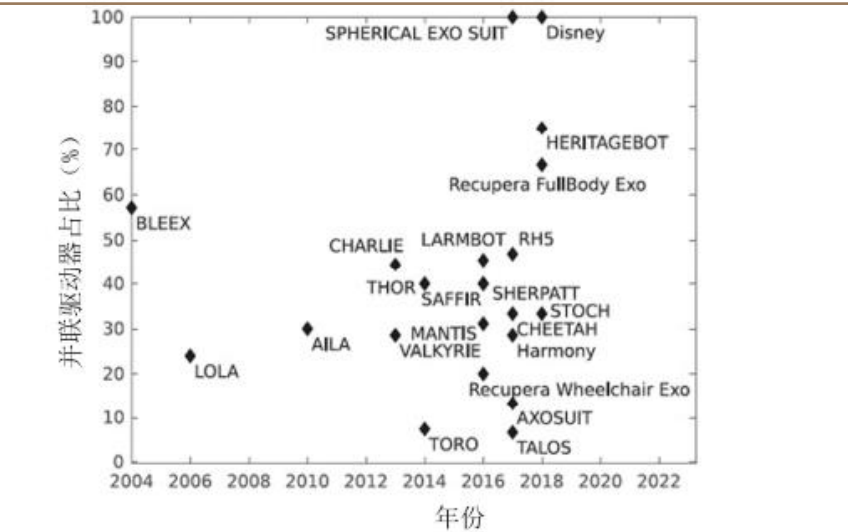


资料来源：Grzegorz Ficht et al. Bipedal Humanoid Hardware Design: a Technology Review, 德邦研究所

目前串并联混合方案是“人腿”构型设计的主流方案

目前并联机构广泛用于机器人腿部设计中，串并联混合腿部构型成为主流方案。一方面，采用并联机构的腿部构型能够实现低惯量、高刚度、高质心、高负载腿的设计；另一方面机器人运动控制理论和技术的发展使得并联机构的构建和控制具有可行性。丁宏钰《双足机器人腿部及其驱动器的设计理论与关键技术研究》表明，自 2013 年后有更多的双足机器人使用并联驱动装置，并联驱动装置在总自由度中占比也在提高。

图表：2013年后，并联驱动装置在总自由度中占比在提高



资料来源：丁宏钰《双足机器人腿部及其驱动器的设计理论与关键技术研究》，德邦研究所

图表：目前串并联混合方案是腿部构型设计的主流方案

型号	DRC-Hubo+	WL-16	ASIMO	LOLA	RH5	WABIAN	Optimus
机构/公司	KAIST	早稻田大学	本田	慕尼黑工业大学	德国人工智能研究中心 (DFKI)	NASA	特斯拉
国家	韩国	日本	日本	德国	德国	美国	美国
时间	2015年	2003年	2000年	2006年	——	2006年	2022年
腿部构型	串联	并联	串并联混合	串并联混合	串并联混合	串并联混合	串并联混合
髋关节	串联	并联	串联	串联	串联	串联	串并联混合
膝关节	串联	并联	并联	并联	并联	串联	并联
踝关节	串联	并联	并联	并联	并联	并联	并联
关节执行器	旋转	直线	旋转	旋转+直线	旋转+直线	旋转+直线	旋转+直线

资料来源：河马机器人，Tesla AI Day2022，丁宏钰《双足机器人腿部及驱动器的设计理论与关键技术研究》等文献，德邦研究所

髋关节、膝关节和踝关节的功能、位置不同，采用不同的机构



德邦证券
Topsperity Securities

- 髋关节常用串联机构或串并联混合机构。髋关节作为腿部的基座需要承受较大负载、且有较大的转动角度/工作空间。
- 串联机构：结构简单，作为腿部基座，其重量和惯量允许稍微较大。各方案差异体现在髋关节三个自由度的排布顺序上。最常用的方案是偏摆-滚动-俯仰（Yaw-Roll-Pitch/Y-R-P），例如：HRP-2, Valkyrie, Hubo等均采用该方案，可最大限度减少滚动和俯仰关节处的惯量（F.Negrello et al. 的研究表明，R-Y-P构型中俯仰关节作为运动链的最后一个关节，相比于P-R-Y减少16%惯量），但无法同时实现较大的工作空间和较小的尺寸。WALKMAN采用R-Y-P方案，略微增加滚动关节的惯量，实现偏摆关节惯量大幅下降。

图表：串联构型的髋关节：各方案差异体现在髋关节三个自由度的排布顺序上

髋关节类型	双足机器人型号
Y-R-P	HRP-2, Valkyrie, HUBO
R-Y-P	WALKMAN
P-R-Y	COMAN
R-P-Y	TORO

资料来源：F.Negrello et al. WALK-MAN Humanoid Lower body Design Optimization for Enhanced Physical Performance, 德邦研究所

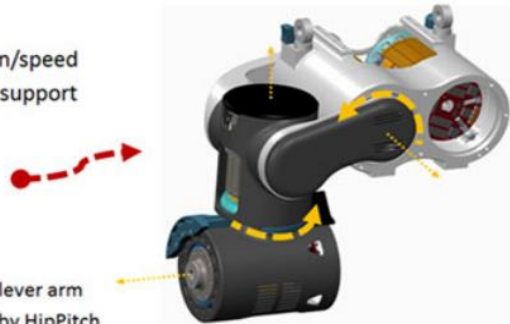
图表：串联结构简单、好控制；并联机构利于减小腿部惯量、提高刚度

Hip Configuration

- Maximize swing acceleration/speed
- Minimize leg drop at single support



- Design choice
 - R-Y-P arrangement
 - Non-intersecting axis
 - Minimum HipRoll-COM lever arm
 - Lowest inertia/mass seen by HipPitch



资料来源：F.Negrello et al. WALK-MAN Humanoid Lower body Design Optimization for Enhanced Physical Performance, 德邦研究所

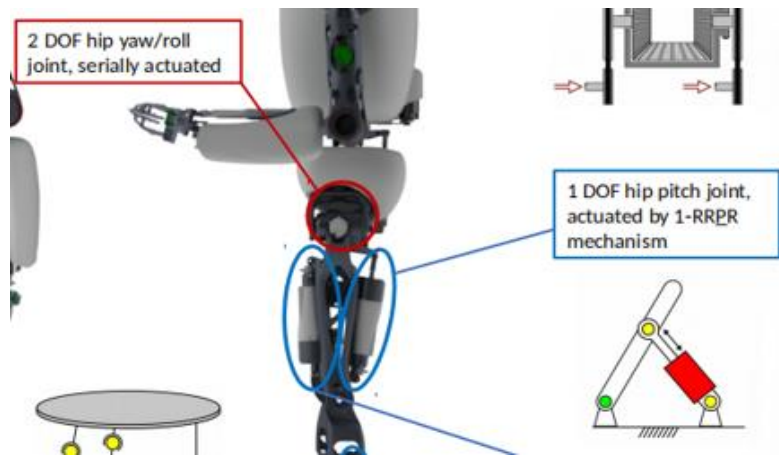
髋关节、膝关节和踝关节的功能、位置不同，采用不同的机构



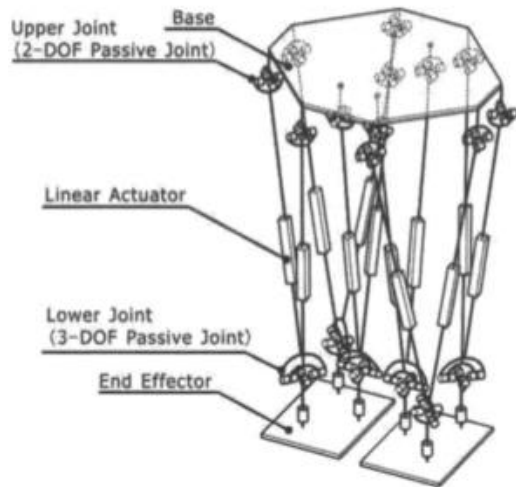
德邦证券
Topsperry Securities

- ❑ **串并联混合机构：**该方案在减小惯量的同时，能够实现较大的工作空间。RHP2采用俯仰和滚动关节并联+单独的偏摆关节的方案，偏摆关节的间隙会略微影响整个腿部的定位精度，俯仰关节和滚动关节由两个线性执行器共同控制。RH5采用偏摆和滚动关节串联+曲柄连杆机构（1-RRPR）驱动俯仰关节，引入了被动关节。
- ❑ **并联机构：**仅采用并联机构方案的设计很少，因该方案髋关节的运动范围受限。WL-16（2006）、ROBIAN（2002）、LISA（2005）等早期的双足机器人有采用并联方案。

图表：RH5采用偏摆和滚动关节串联+曲柄连杆机构（1-RRPR）驱动俯仰关节



图表：WL-16（2006）等早期的双足机器人有采用并联髋关节方案



资料来源：Julian Eßer et al. *Design analysis and control of the series-parallel hybrid RH5 humanoid robot*, 德邦研究所

资料来源：Yusuke Sugahara et al. *WL-16R11: Prototype of Biped Walking Wheelchair*, 德邦研究所

更多免费行业报告

并购家

www.ipopo.cn

髋关节、膝关节和踝关节的功能、位置不同，采用不同的机构



德邦证券
Topsperity Securities

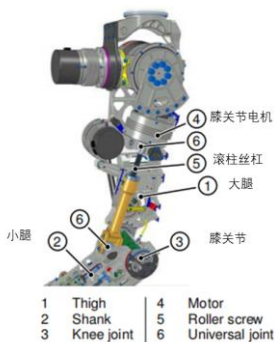
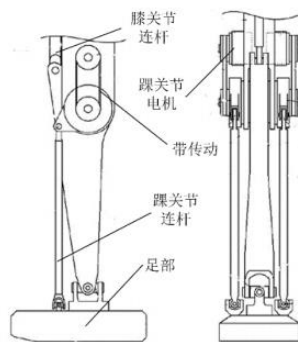
- 膝关节采用旋转执行器或直线执行器驱动，通常将膝关节电机上移到大腿，通过连杆机构将动力传输到膝关节位置。在腿部弯曲时，膝关节需要承受很大负载，要求较大的输出转矩，但是较大转矩的电机会增大腿部体积、重量和惯量，大减速比的减速器输出速度降低、减少关节的反驱动能力。
- 常见的解决办法：（1）改进关节电机：当前双足机器人多采用高输出的无框电机，如WALK-MAN、COMAN等；（2）增加传动装置：各机器人方案采用的传动方式存在差异。如ASIMO将膝关节电机布置在大腿中部，通过四连杆机构把动力传递到膝关节位置；LOLA和RH5采用具有线性驱动器的曲柄连杆机构实现；Kohei Tomishiro et al. *Design of Robot Leg with Variable Reduction Ratio Crossed Four-bar Linkage Mechanism* 中模仿动物的十字韧带设计了交叉四连杆机构用于膝关节，提高了足式机器人的跳跃高度。

图表：通常将膝关节电机上移到大腿，通过连杆机构将动力传输到膝关节位置

型号	推出时间	执行器类型	膝关节电机位置	传动机构
ASIMO	2000年	旋转执行器	上移到大腿中部	四连杆机构
Coman	2012年	旋转执行器	膝关节位置	——
DRC-Hubo+	2015年	旋转执行器	膝关节位置	——
LOLA	2006年	线性执行器	靠近髋关节	曲柄连杆机构
Optimus	2022年	线性执行器	上移到大腿	四连杆机构
RH5	——	线性执行器	上移到大腿	曲柄连杆机构
WALK-MAN	2015年	旋转执行器	靠近髋关节	四连杆机构
WL-16	2003年	线性执行器	——	——

资料来源：河马机器人，丁宏钰《双足机器人腿部及驱动器的设计理论与关键技术研究》等文献，德邦研究所

图表：ASIMO：旋转执行器+四连杆机构，LOLA：线性驱动器+曲柄连杆机构



资料来源：丁宏钰《双足机器人腿部及驱动器的设计理论与关键技术研究》，*Leg Mechanism of LOLA*，德邦研究所

髋关节、膝关节和踝关节的功能、位置不同，采用不同的机构



德邦证券
Topsperity Securities

- **踝关节两个自由度常采用并联机构。**相比于髋关节和膝关节，踝关节采用并联构型的优势更大，具体体现在：（1）并联机构的采用增大踝关节的刚度，增强直立状态的稳定性且不需太高的扭矩输出。（2）通过将执行器、减速器等重量大的部件上移到小腿或大腿处，可以实现低惯量腿的设计。各方案具体实现存在差异，通常以连杆（ASIMO、TORO、Valkyrie）或丝杠方式（LOLA、RH5、Optimus）实现。

图表：踝关节两个自由度常采用并联机构

型号	推出时间	机构类型	执行器类型	踝关节电机位置	传动装置
ASIMO	2000年	并联	旋转执行器	上移到膝关节中心	同步带、连杆
DURUS	——	并联（两个电机和减速器交错布置）	旋转执行器	——	——
DRC-Hubo+	2015年	串联	旋转执行器	踝关节处	——
LOLA	2006年	并联（2-PSU+1U）	线性执行器	上移到大腿	同步带、滚柱丝杠
Optimus	2022年	并联	线性执行器	上移到小腿	滚柱丝杠
RH5	——	并联（2-SPRR+U）	线性执行器	——	丝杠
TORO	2012年	并联	旋转执行器	上移到膝关节下	连杆
Valkyrie	2013年	并联	线性执行器	——	连杆
WL-16	2003年	并联	线性执行器	——	——

资料来源：河马机器人，IEEE，丁宏钰《双足机器人腿部及驱动器的设计理论与关键技术研究》等文献，德邦研究所

图表：LOLA和Valkyrie分别通过丝杠、连杆方式实现踝关节并联机构

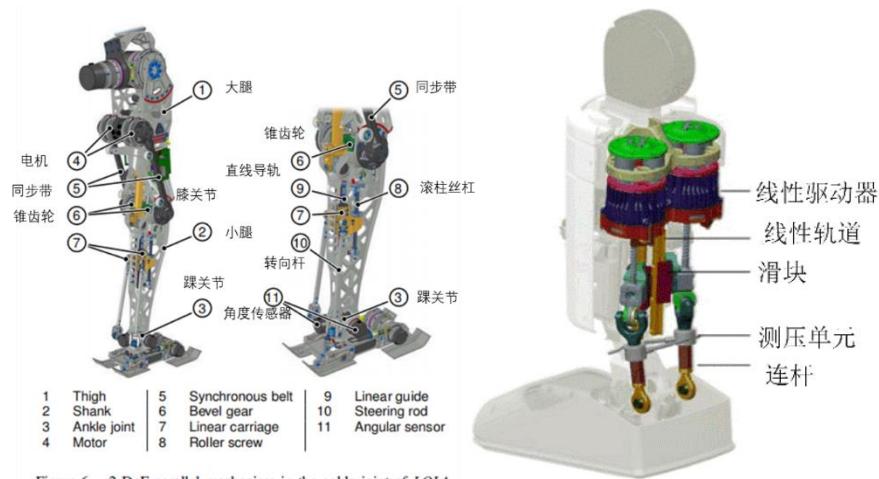


Figure 6. 2-DoF parallel mechanism in the ankle joint of LOLA

资料来源：丁宏钰《双足机器人腿部及驱动器的设计理论与关键技术研究》，Leg Mechanism of LOLA，德邦研究所

04

创新腿方案：

“鸟腿”和合成腿相较“人腿”具备自身优势

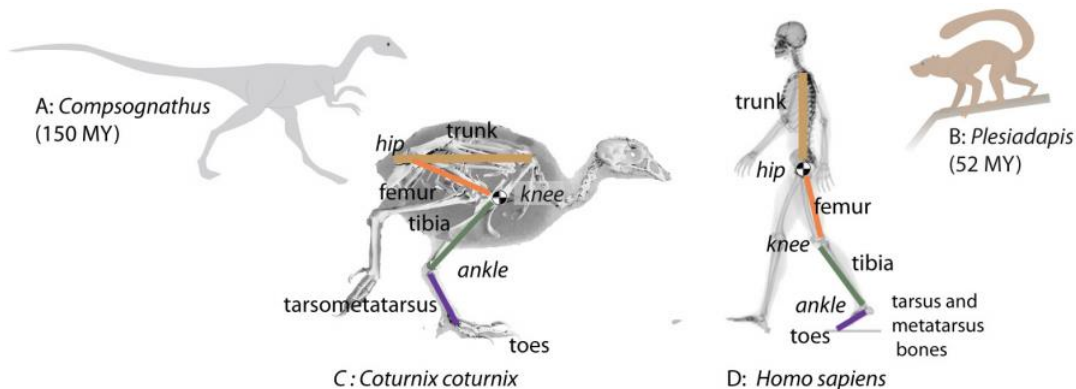
“鸟腿”低耗能、高性能、易控制、高便利



德邦证券
Topsperity Securities

- 鸟类和人类在行走过程中姿态不同。(1)行走中，人抬脚曲膝，但是脚和脚趾始终保持向前；(2)而对于鸟类，腿和脚关节的机械耦合使鸟在摆腿中会把脚向后折叠，使得像鸵鸟（有的体重超过100kg，奔跑速度可以达到55km/h）一样的大型鸟可以快速奔跑、不费力地保持直立状态。
- 鸟类的腿部控制由其神经系统和机械构造共同完成。Monica Daley et al. *BirdBot is energy-efficient thanks to nature as a model* 研究表明，鸟类腿部对障碍物的反应速度超过神经系统发挥作用的速度，其独特的多关节肌肉-肌腱结构和脚步运动方式在腿部控制中发挥作用，因此大型鸟可以实现双足稳定、快速、低耗能奔跑。

图表：鸟类和人类的腿部构型存在差异，在行走过程中呈现不同的姿态



资料来源：Anick Abourachid et al. *The Natural Biped, Birds and Humans: An Inspiration for Bipedal Robots*, 德邦研究所

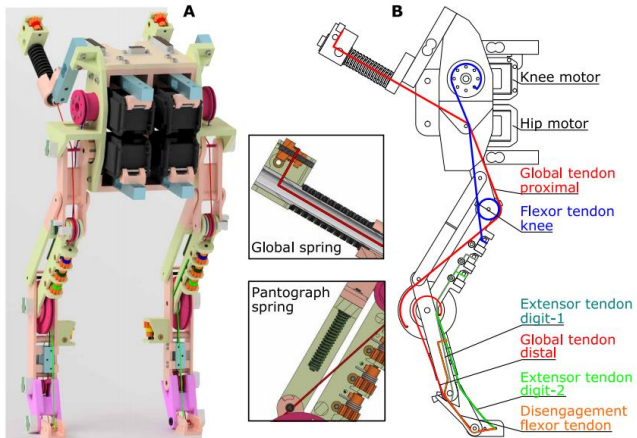
“鸟腿”低耗能、高性能、易控制、高便利



德邦证券
Topsperity Securities

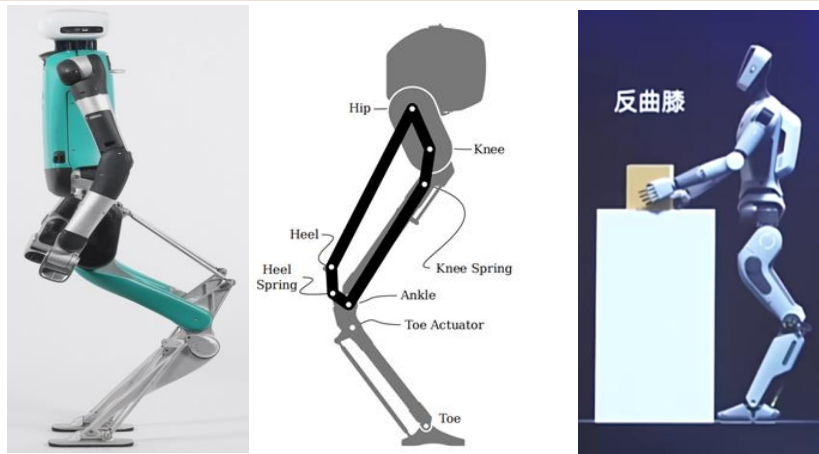
- ❑ 基于鸟类步态分析设计出的“鸟腿”：Badri-Spröwitz et al. 在基于鸟类的步态分析设计出了BirdBot，单腿2DOF，其中髋关节1DOF负责前后摆腿，另外1DOF负责膝盖弯曲（摆腿阶段）。优势体现在：（1）通过纯机械方法实现双足机器人步态切换，在站立过程、站立和摆腿动作切换中无需耗能，节能、承载力好、可实现远距离行走；（2）主动关节数目少，腿部控制简单、动态响应速度快，减少对信号传输速度和传感器要求。
- ❑ 基于运动性能优化设计出的伪“鸟腿”：Agility Robotics（迅捷机器人）研发的Cassie和Digit采用伪“鸟腿”，或称“反关节”设计，单腿5DOF。该构型最大的好处在于较优的移动性能、可在复杂地形上移动且双腿可折叠便于工厂工作及储存。智元机器人在2023年推出的远征A1也具有“反关节”设计，使双足机器人能够拥有更大的操作空间以应对更多的任务场景。

图表：BirdBot的“鸟腿”设计基于鸟类步态分析，低耗能、高性能



资料来源：Alexander Badri-Spröwitz et al. *BirdBot achieves energy-efficient gait with minimal control using avian-inspired*

图表：Digit和远征A1的伪“鸟腿”，便捷性、应用性强



资料来源：Andrew M. Abate *Mechanical Design for Robot Locomotion*, 远征A1发布会，德邦研究所

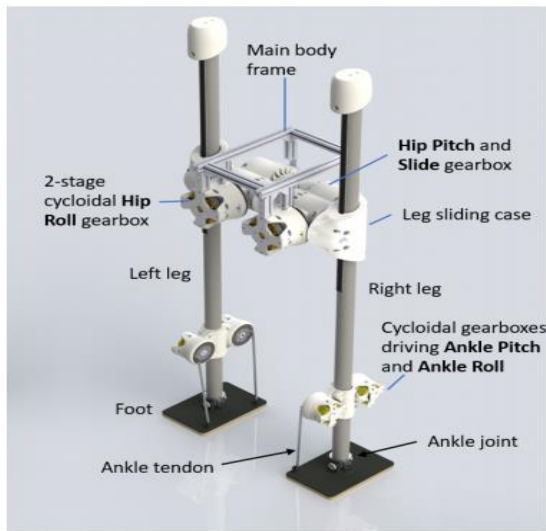
少数方案采用合成腿，能弥补单一生物启发式腿部设计的缺陷



德邦证券
Topsperity Securities

- ❑ **SLIDER: 没有膝关节的腿部设计，髋关节4DOF（滚动、俯仰、偏摆和滑动）+踝关节2DOF。**当前双足机器人实现直腿行走较为困难，大多数双足机器人需要在行走过程中维持膝盖弯曲以避免膝关节的奇异问题，将总质心控制在稳定的高度以便控制。该设计存在三点显著优势：（1）省去膝关节电机以降低腿部质量、惯量和设计难度，同时可以保持和人腿相同的功能；（2）减小行走过程中总质心在垂直方向的移动，与倒立摆模型更相近（机器人控制常用模型，符合该模型的腿部构型可以实现高动态运动性能）。（3）实现直腿行走。

图表：SLIDER腿部无膝盖，髋关节4DOF+踝关节2DOF



图表：SLIDER腿部设计实现轻量化

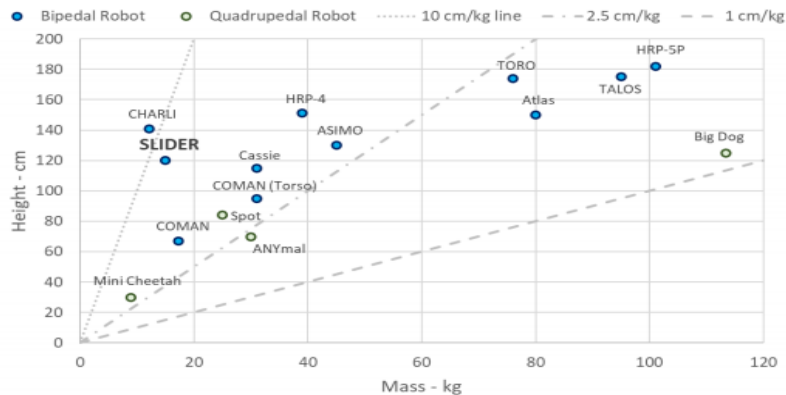


Fig. 3: Height-mass relationship of selected robots.

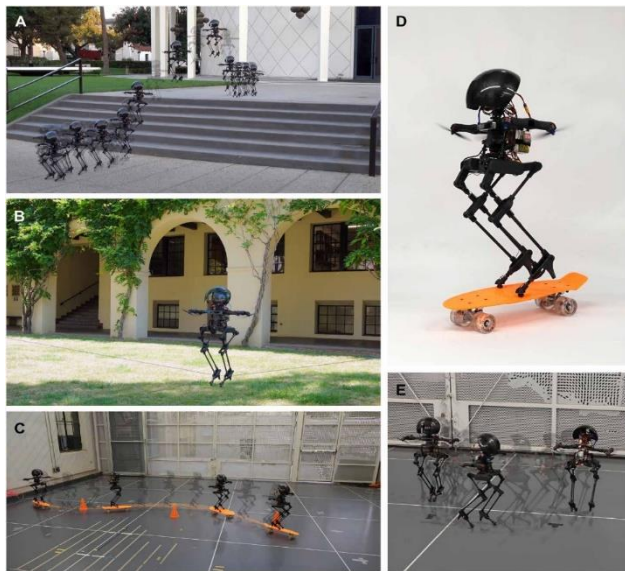
少数方案采用合成腿，能弥补单一生物启发式腿部设计的缺陷



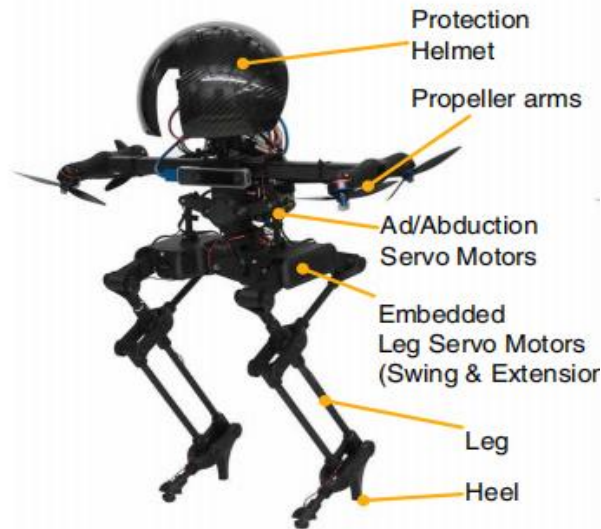
德邦证券
Topsperity Securities

- **LEO：能飞行、走钢丝和滑滑板的机器人，单腿3DOF。**同时控制螺旋桨和腿部关节，LEO的设计可以使双足机器人：（1）更高的平衡力，完成走钢丝和滑滑板等复杂动作；（2）更敏捷的行走状态。多模式运动能力使其相比于仅能双腿行走的机器人有更广的应用空间。但其腿部仅有3个自由度，其跌倒爬起能力受限。

图表：LEO能飞行、走钢丝和滑滑板



图表：LEO单腿3DOF，跌倒爬起能力受限



资料来源：Kyunam Kim et al. A bipedal walking robot that can fly, slackline, and skateboard, 德邦研究所

资料来源：Kyunam Kim et al. A bipedal walking robot that can fly, slackline, and skateboard, 德邦研究所 22

风险提示

- 人形机器人研发进展不及预期
- 人形机器人产业化进展不及预期
- 行业竞争加剧

分析师与研究助理简介

陆强易：德邦证券研究所人形机器人&制造中小盘组分析师。华中科技大学金融学本科，中央财经大学金融学硕士，3年国家信息中心经济咨询中心高级分析师经验，主要从事新能源汽车市场咨询工作；2年东北证券汽车高级研究员经验，主要覆盖汽车电子和重卡。

完颜尚文：德邦证券研究所人形机器人&制造中小盘助理研究员。南京大学工学学士、金融硕士。曾就职于中投公司，参与多个非公开市场基金、跟投项目的投资立项、尽职调查与风险管理工作。

投资评级说明

	类 别	评 级	说 明
1. 投资评级的比较和评级标准： 以报告发布后的6个月内的市场表现为比较标准，报告发布日后6个月内的公司股价（或行业指数）的涨跌幅相对同期市场基准指数的涨跌幅；	股票投资评级	买入	相对强于市场表现20%以上；
		增持	相对强于市场表现5%~20%；
		中性	相对市场表现在-5%~+5%之间波动；
		减持	相对弱于市场表现5%以下。
2. 市场基准指数的比较标准： A股市场以上证综指或深证成指为基准；香港市场以恒生指数为基准；美国市场以标普500或纳斯达克综合指数为基准。	行业投资评级	优于大市	预期行业整体回报高于基准指数整体水平10%以上；
		中性	预期行业整体回报介于基准指数整体水平-10%与10%之间；
		弱于大市	预期行业整体回报低于基准指数整体水平10%以下。

免责声明

分析师声明：本人具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格，以勤勉的职业态度、专业审慎的研究方法，使用合法合规的信息，独立、客观地出具本报告，本报告所采用的数据和信息均来自市场公开信息，本人对这些信息的准确性或完整性不做任何保证，也不保证所包含的信息和建议不会发生任何变更。报告中的信息和意见仅供参考。本人过去不曾与、现在不与、未来也将不会因本报告中的具体推荐意见或观点而直接或间接接收任何形式的补偿，分析结论不受任何第三方的授意或影响，特此声明。

法律声明：

德邦证券股份有限公司（以下简称“本公司”）的客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议。在任何情况下，本公司不对任何人因使用本报告中的任何内容所引致的任何损失负任何责任。本报告所载的资料、意见及推测仅反映本公司于发布本报告当日的判断，本报告所指的证券或投资标的的价格、价值及投资收入可能会波动。在不同时期，本公司可发出与本报告所载资料、意见及推测不一致的报告。市场有风险，投资需谨慎。本报告所载的信息、材料及结论只提供特定客户作参考，不构成投资建议，也没有考虑到个别客户特殊的投资目标、财务状况或需要。客户应考虑本报告中的任何意见或建议是否符合其特定状况。在法律许可的情况下，德邦证券及其所属关联机构可能会持有报告中提到的公司所发行的证券并进行交易，还可能为这些公司提供投资银行服务或其他服务。本报告仅向特定客户传送，未经德邦证券研究所书面授权，本研究报告的任何部分均不得以任何方式制作任何形式的拷贝、复印件或复制品，或再次分发给任何其他人，或以任何侵犯本公司版权的其他方式使用。所有本报告中使用的商标、服务标记及标记均为本公司的商标、服务标记及标记。如欲引用或转载本文内容，务必联络德邦证券研究所并获得许可，并需注明出处为德邦证券研究所，且不得对本文进行有悖原意的引用和删改。根据中国证监会核发的经营证券业务许可，德邦证券股份有限公司的经营范围包括证券投资咨询业务。



德邦证券
Topsperry Securities

德邦证券股份有限公司

地 址：上海市中山东二路600号外滩金融中心N1幢9层

电 话：+86 21 68761616 传 真：+86 21 68767880

400-8888-128