



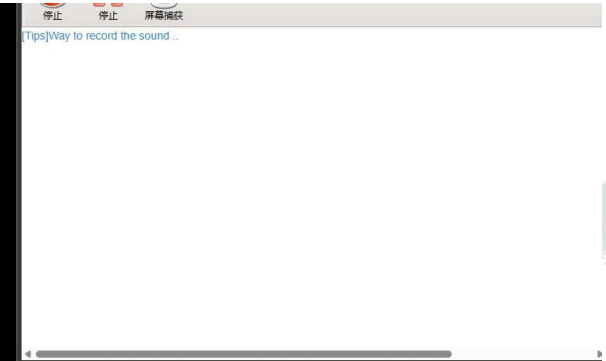
第 2 章 运动

- ◇ 运动方式
- ◇ 运动稳定性
- ◇ 各类移动机器人





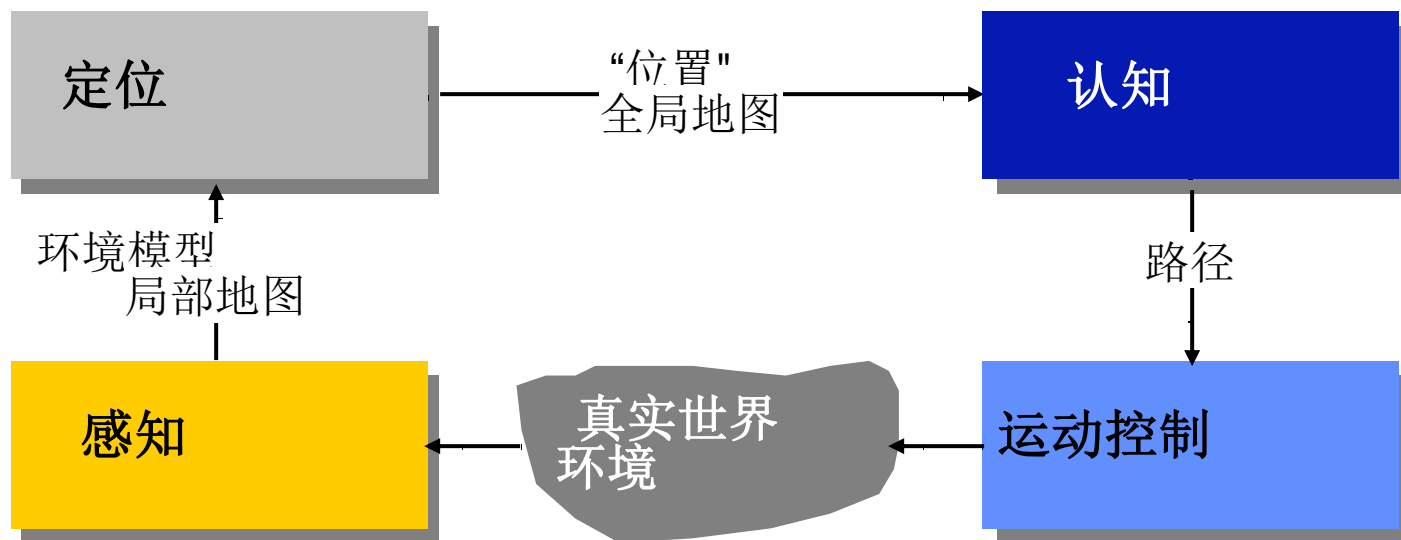
Eon Systems

















运动的概念

- ◇ 概念
- ◇ 腿式运动
- ◇ 轮式运动





运动概念：自然界的发现

运动类型	对运动的阻力	运动的基本运动学
液体在沟里流动 	液体阻力	旋度 
蠕动 	摩擦力	纵向振动 
滑行 	摩擦力	横向振动 
跑 	重力	多节摆的摆动运动 
跳 	重力	多节摆的摆动运动 
走 	重力	多边形转动 

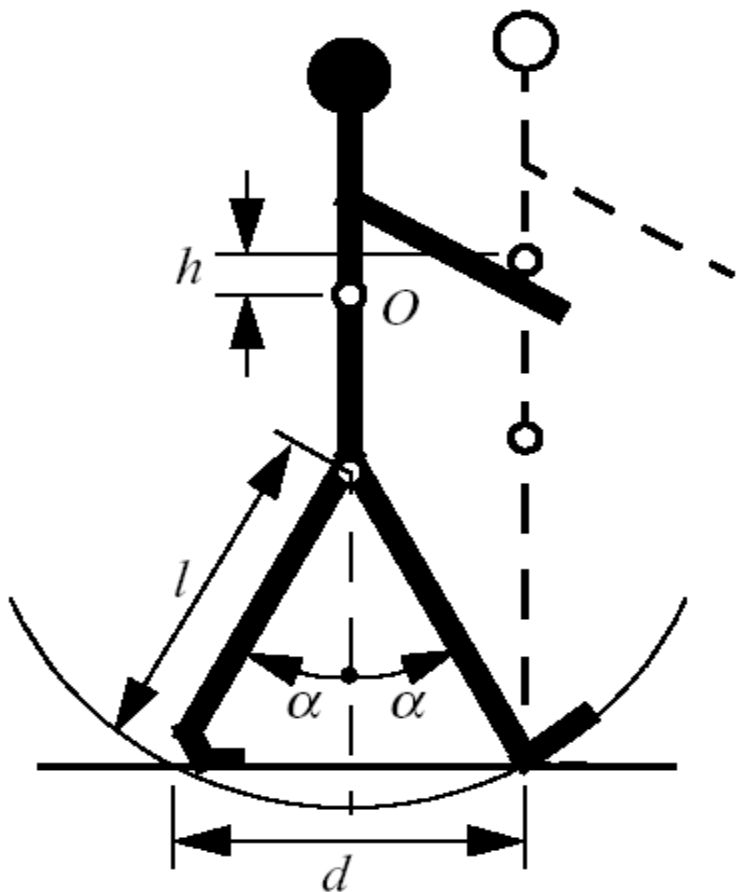


运动的概念

- ◇ 源于生物系统的概念
 - ◇ 仿造技术有困难
- ◇ 许多技术使用轮或履带（象毛虫）
- ◇ 滚动是最高效的，但在生物界未找到
 - ◇ 自然界没有发明轮子!
- ◇ 然而，两足行走与滚动近似



两足行走



◇ 两足行走机理

◇ 并非真正的滚动。

◇ 滚动的多边形，边长相当于步长。

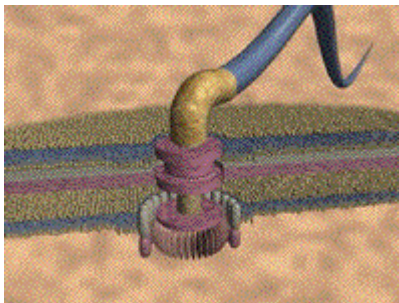
◇ 步长越小，多边形就越接近圆
(步行就越接近滚动)。

◇ 然而，自然界并没有进化出完整的旋转关节。



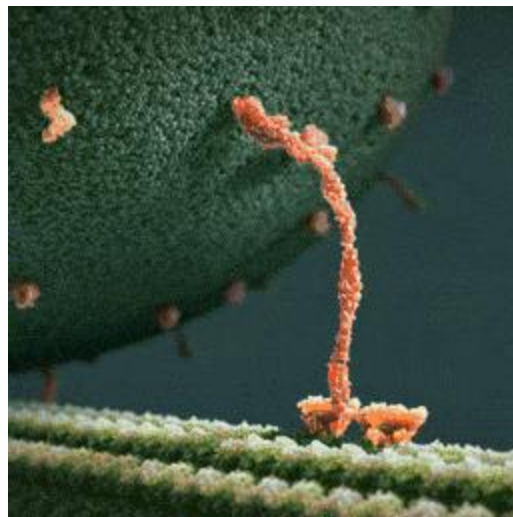
二十世纪最伟大的反直觉发现

- ◆ 这是一个自然界最微小的轮轴系统（“关于大自然为什么没发明轮子”的讨论可以休矣），一部细微精巧藐视所有人类技术的纳米机器。
- ◆ 鞭毛是一个复合蛋白装置，穿透细菌的细胞膜延伸到外部。在膜内部，鞭毛的蛋白构件呈同心圆环状排列，有三个环绕根的蛋白“齿”，作为定子的凸起曲杆。鞭毛受化学渗透作用驱动，细胞膜外的质子水库透过穿透鞭毛的同心圆蛋白孔道滑落，赋予定子张力，定子顺次扭转一部分化学键，驱动中间的转子旋转。转子是穿透整个装置延伸到外部的蛋白构件，形状就像你喝可乐的吸管，外部弯折，拐弯处还有一个蛋白护套。转子根部受定子驱动而旋转，外部跟着搅动，就像你用手搓吸管，吸口处发生的搅动。细菌就用这样的装置“划水”，转子速度可达每秒几千转，细菌的运动速度可达每秒60个身位，（猎豹的最高速度也才每秒25个身位），可见这个运动机器的高效。鞭毛还有一个开关蛋白，稍稍变化形状就能反转整个装置旋转的方向。





微观世界的腿式运动

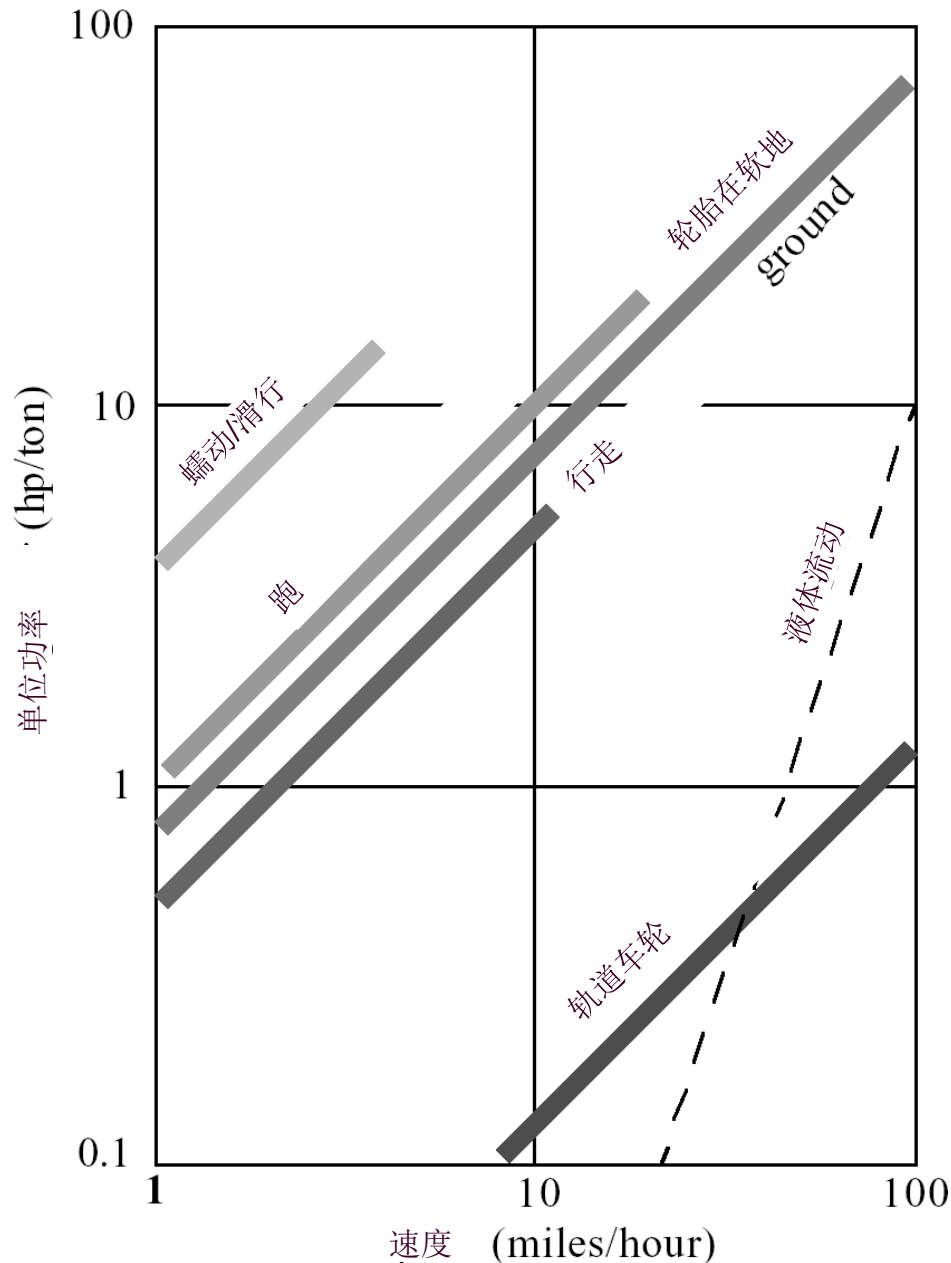


网络上很火的所谓肌球蛋白运输内啡肽的**GIF**
驱动蛋白(kinesin)而不是肌球蛋白
Motor protein



步行还是滚动?

- ◇ 执行器数量
- ◇ 结构复杂性
- ◇ 控制费用 (代价)
- ◇ 效率
 - ◇ 不同地形 (平地、软地、攀爬..)





运动概念的特性描述

◇ 运动

◇ 机器人与环境之间的物理相互作用。

◇ 与运动有关系的为：**相互作用力**、产生相互作用力的**机构**和**执行器**。

◇ 运动相关要素和问题：

稳定性

- 接触点的数目
- 重心
- 地形的倾斜度
- 静态/动态稳定性

接触特征

- 接触点或接触区
- 接触角度
- 摩擦

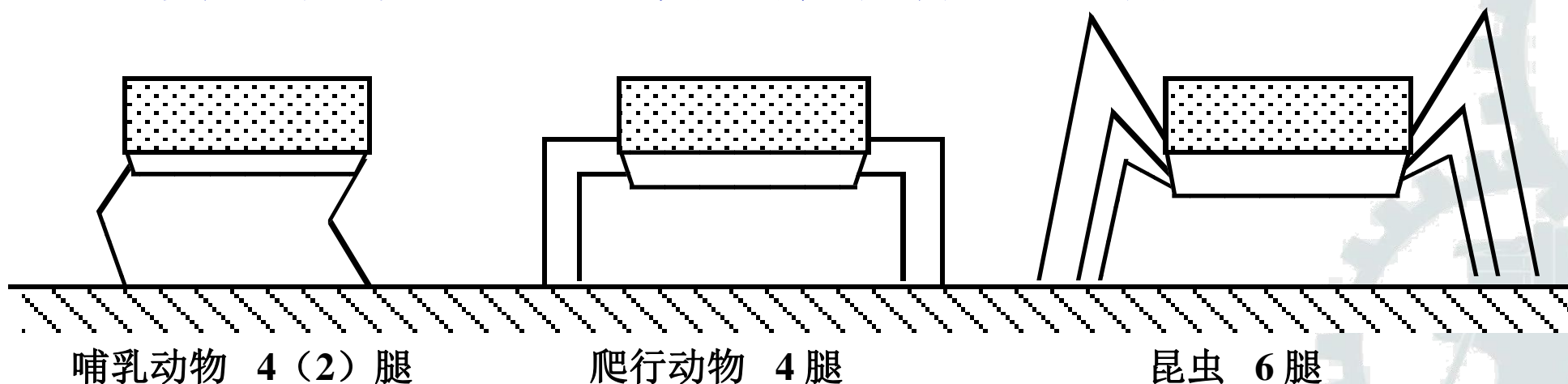
环境类型

- 结构
- 介质(水、空气、软或硬的地面)



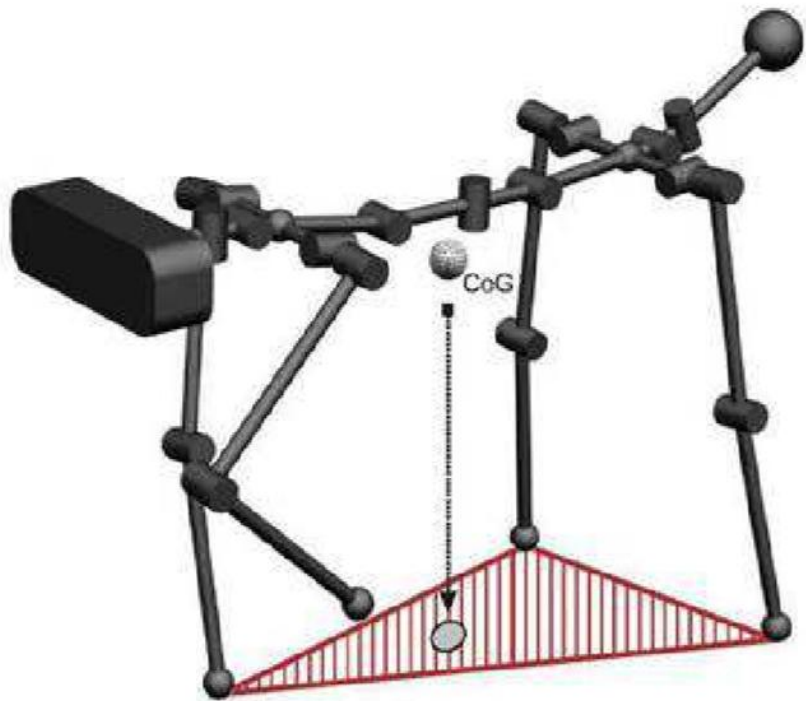
腿式移动机器人 (步行机器)

- ◇ 腿越少，运动越困难
 - ◇ 稳定性，至少需要三条腿才能实现静态稳定
- ◇ 在行走过程中，要抬起一些腿
 - ◇ 于是失去稳定性了？
- ◇ 为稳态行走，至少需要6条腿？（可以讨论）
 - ◇ 婴儿必须化费一段时间，才能学会用两条腿站立和行走。

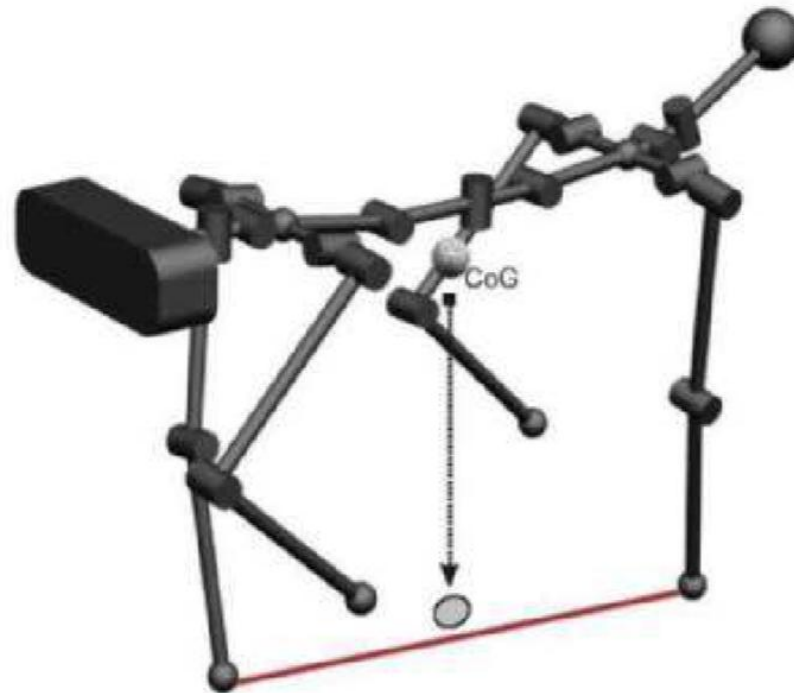




静态稳定性与动态稳定性



静态行走



动态行走

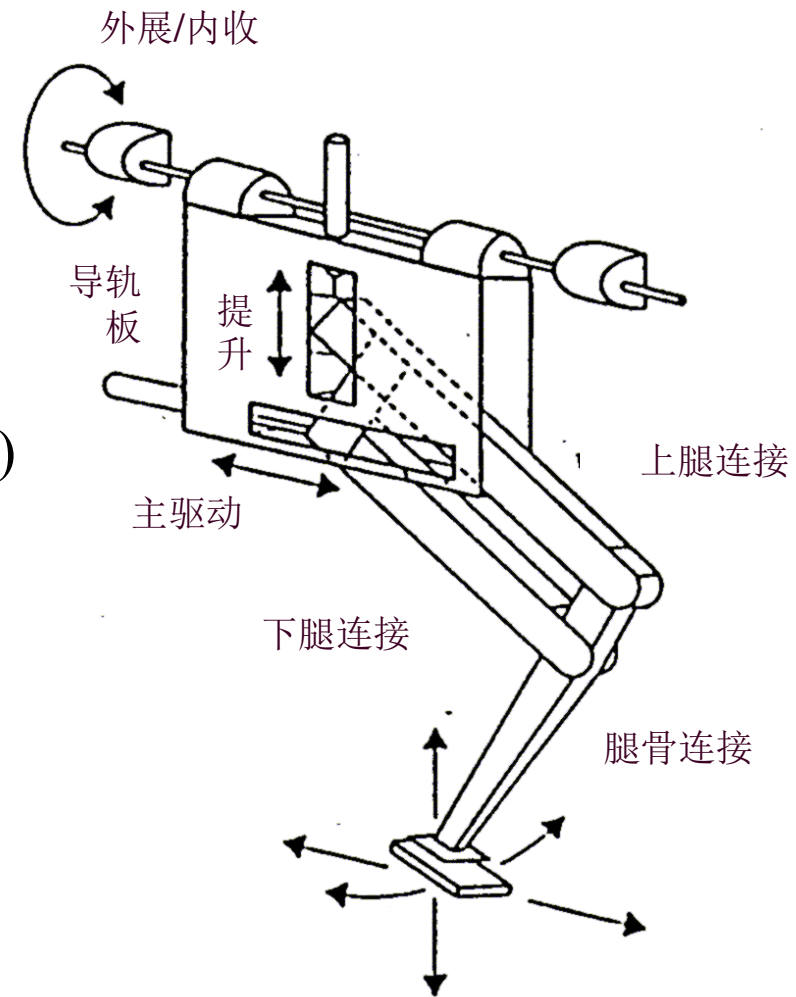
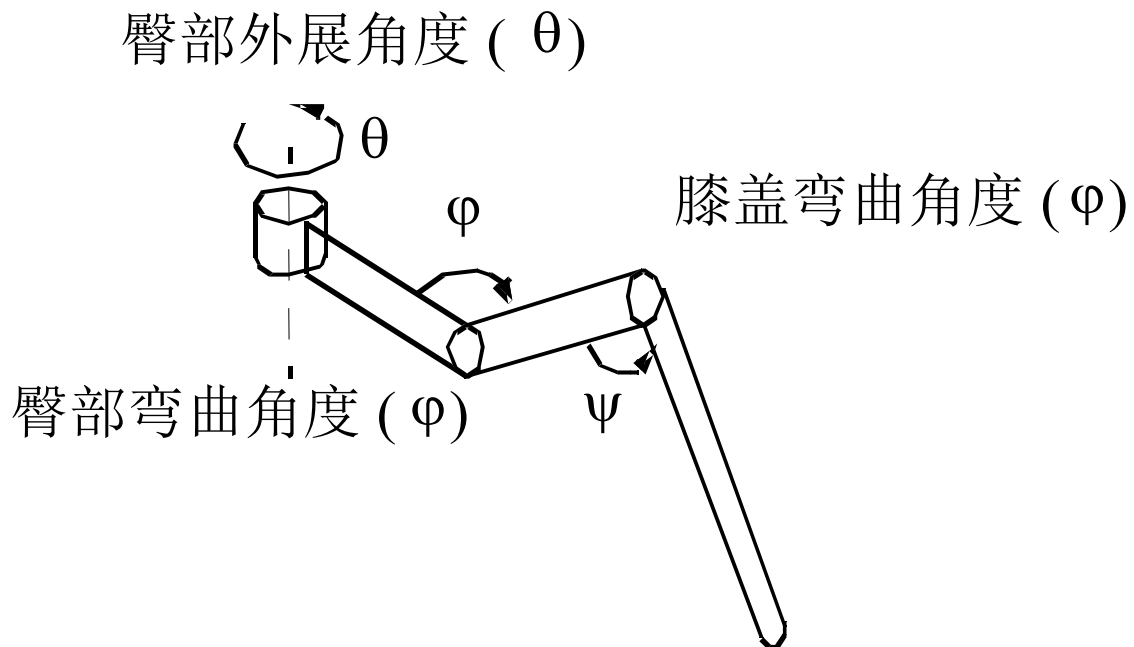


每条腿的关节数 (DOF: 自由度)

- ◇ 最少需要 2 个自由度才能将一条腿向前移动
 - ◇ 一个抬起和一个摆动运动。
- ◇ 大多数情况，每条腿 3 个自由度（使足部有三个自由度）。
- ◇ 第 4 个自由度是踝关节
 - ◇ 可能改善行走（足与地面接触的角度，甚至会 5 个自由度）
 - ◇ 然而，附加关节（自由度）会增加设计难度，尤其是运动控制的复杂度。



3自由度腿的例子





2腿行走的步态

- ◇ 原理上来讲只能获得动态稳定性
- ◇ 大脚使得可以保持静态稳定

四种状态

右腿旋转或跛行 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 1$

左腿旋转或跛行 $1 \rightarrow 3 \rightarrow 1$

双足跳 $1 \rightarrow 4 \rightarrow 1$

走或跑 $2 \rightarrow 3 \rightarrow 2$

右腿跳 $2 \rightarrow 4 \rightarrow 2$

左腿跳 $3 \rightarrow 4 \rightarrow 3$



可能的步态数目

- ◇ 步态，是由抬起和放下各腿的事件序列描述的。
 - ◇ 依赖于腿的数目。
 - ◇ 对于 k 条腿机器，可能的步态数 N 为：

$$N = (2k - 1)!$$

- ◇ 2 腿行走机器 ($k=2$) 的可能步态数 N 为：

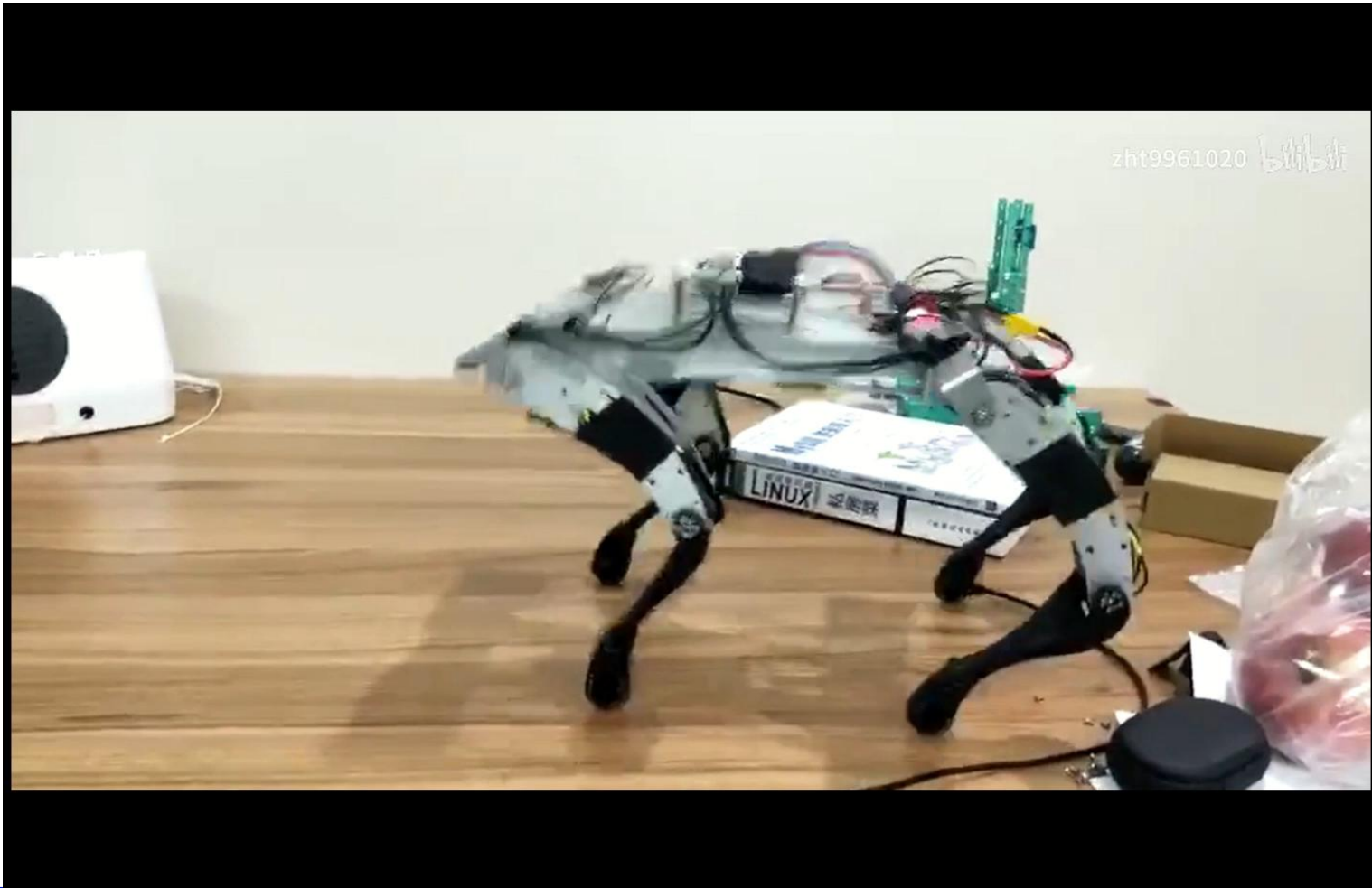
$$N = (2k - 1)! = 3! = 3 \cdot 2 \cdot 1 = 6$$

- ◇ 对于 6 腿机器人 (六足虫)， N 已经大到：

$$N = 11! = 39916800$$



四足行走





四足行走



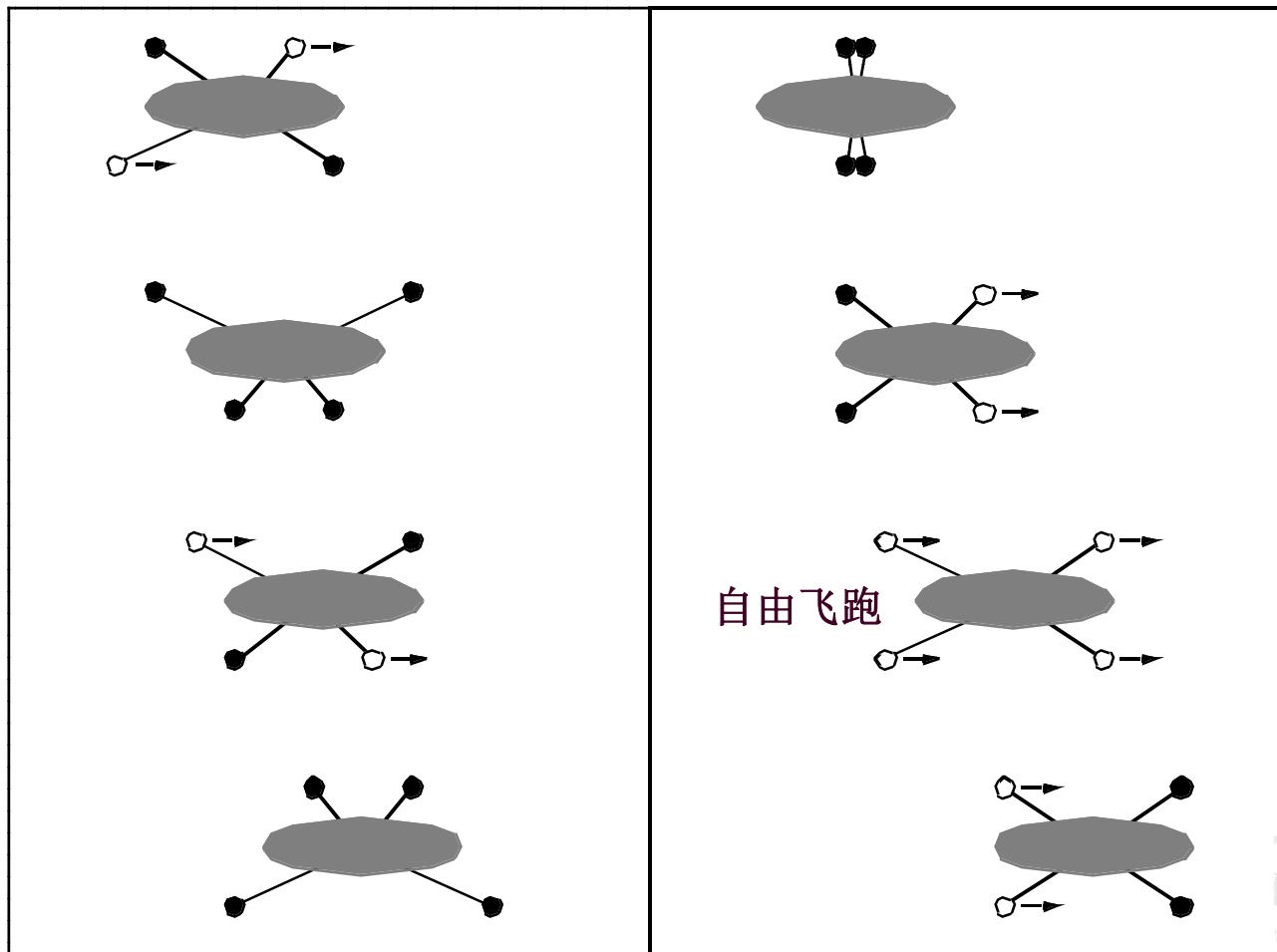


六足行走



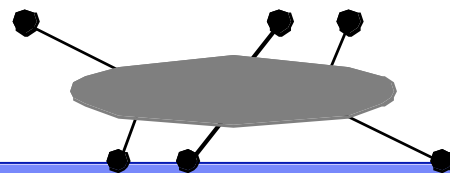
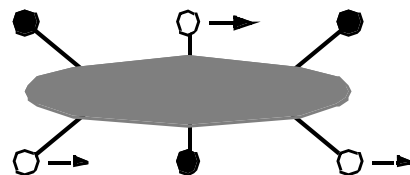
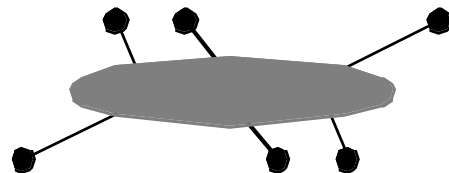
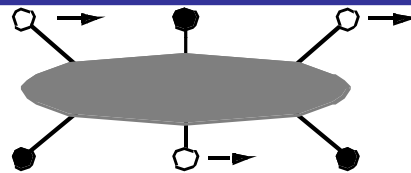


4 腿时最明显的步态





6 腿时最明显的步态 (静态行走)





动力学因素的考虑

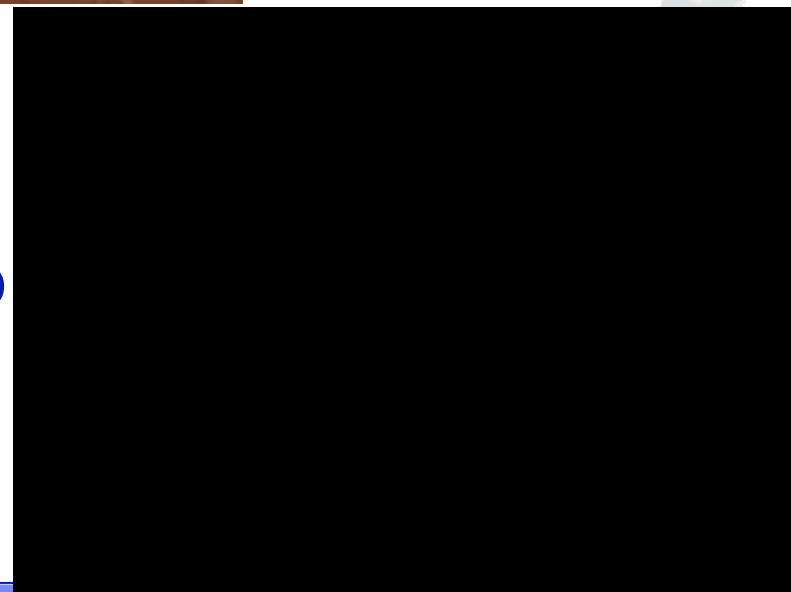
◇ 借助于机械结构的设计

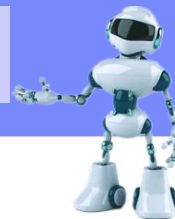
- ◇ 摆动的自然震荡
- ◇ 弹簧



◇ Cornell Ranger

- ◇ 不续航情况下行走**64.8公里**（2011）
- ◇ 不续航情况下行走**22.88公里**（2010）
- ◇ 记录之前由**Big dog**保持**20.48公里**



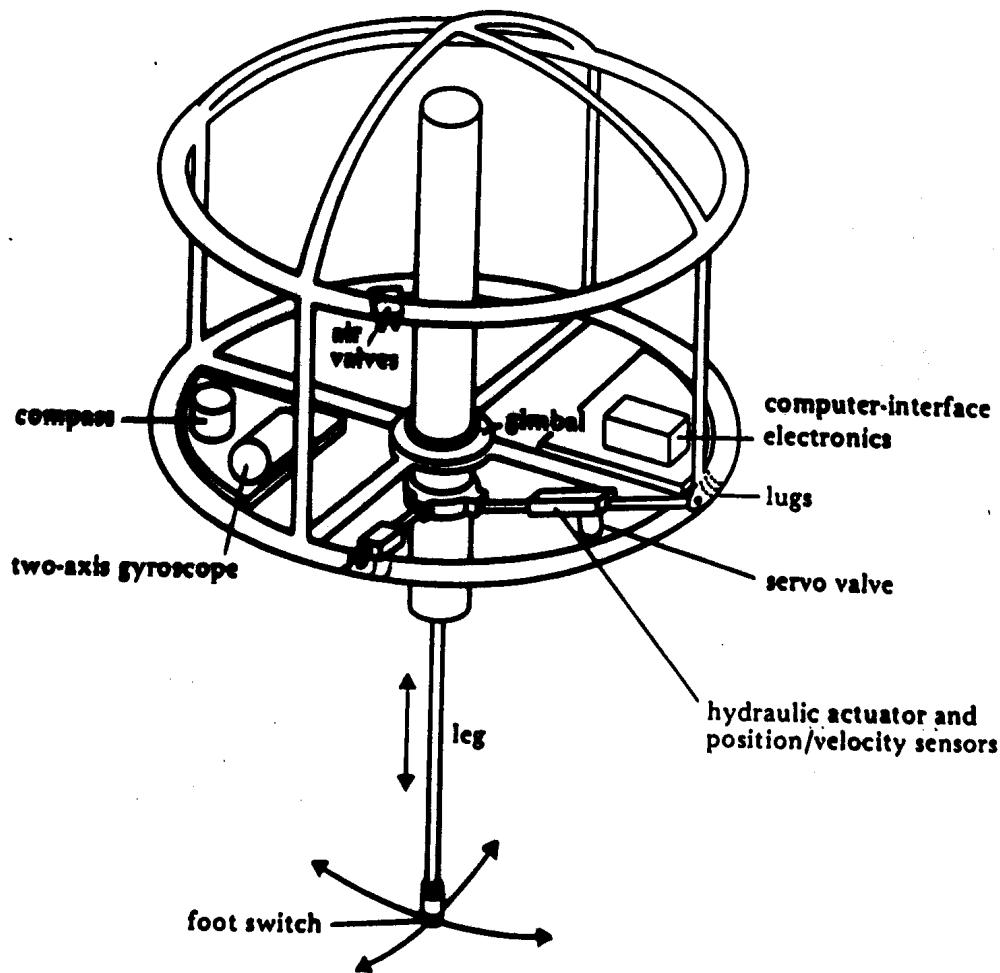


行走机器的例子

◆ 至今没有工业应用，只是一个热门的研究领域。



跳跃机器

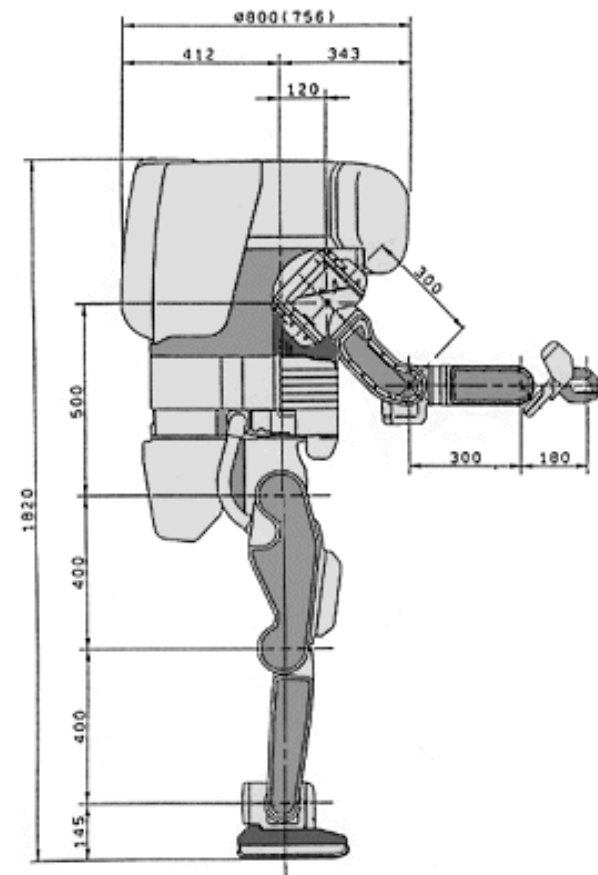
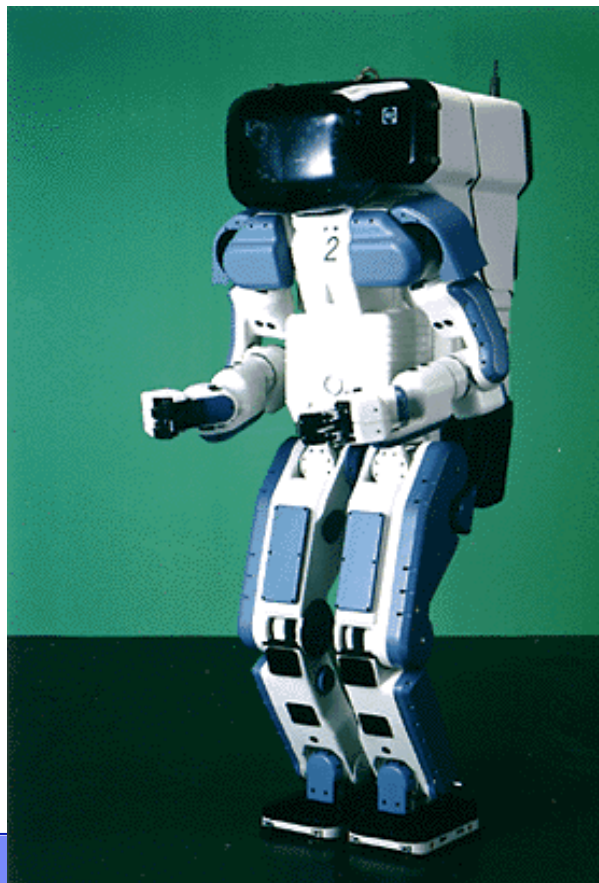




人形机器人

◇ 日本 本田的 P2

- ◇ 最大速度: 2 km/h
- ◇ 自住性: 15 min
- ◇ 重量: 210 kg
- ◇ 高度: 1.82 m
- ◇ 腿自由度: 2*6
- ◇ 臂自由度: 2*7





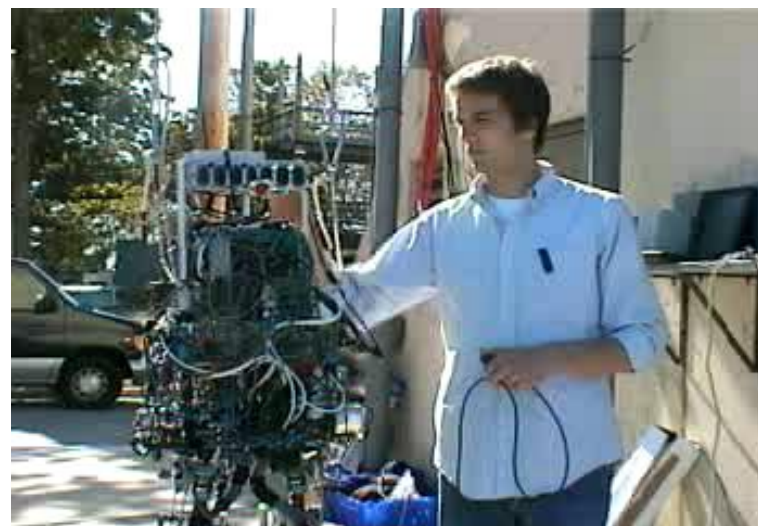
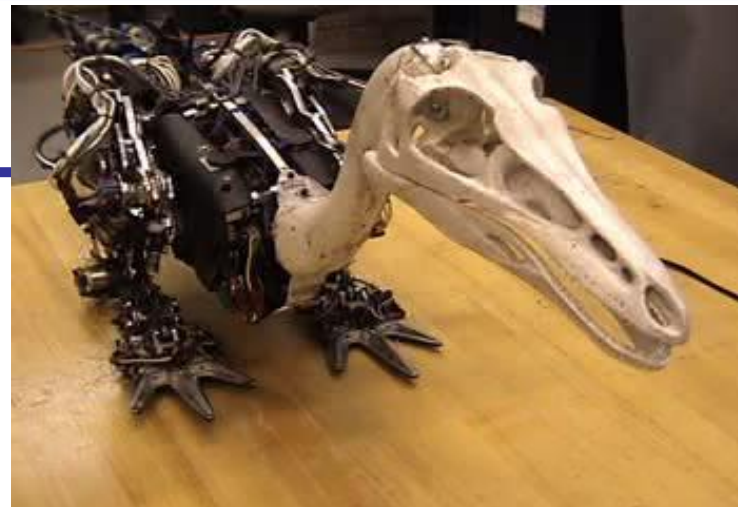
两足动物型机器人

◆ MIT 的 Leg 实验室

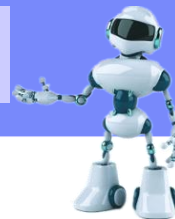
◆ 火烈鸟，两足奔跑机器

◆ “Troody” 恐龙型机器人

◆ “M2” 拟人机器人

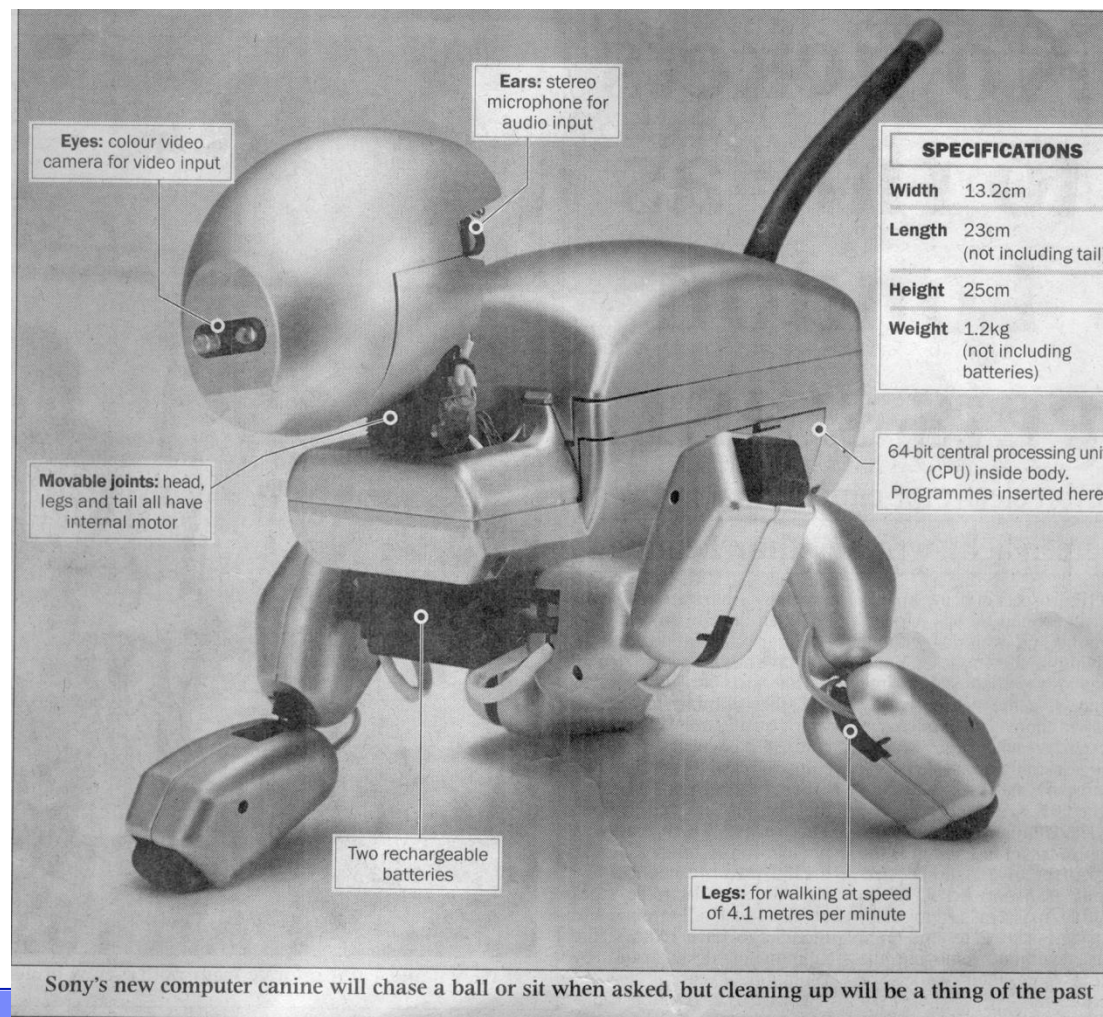


more infos : <http://www.ai.mit.edu/projects/leglab/>



4 腿行走机器人

◇ 日本索尼的人造狗 Aibo



CMPack '03
vs.
Yellow Jackets
American Open 2003



4 腿行走机器人

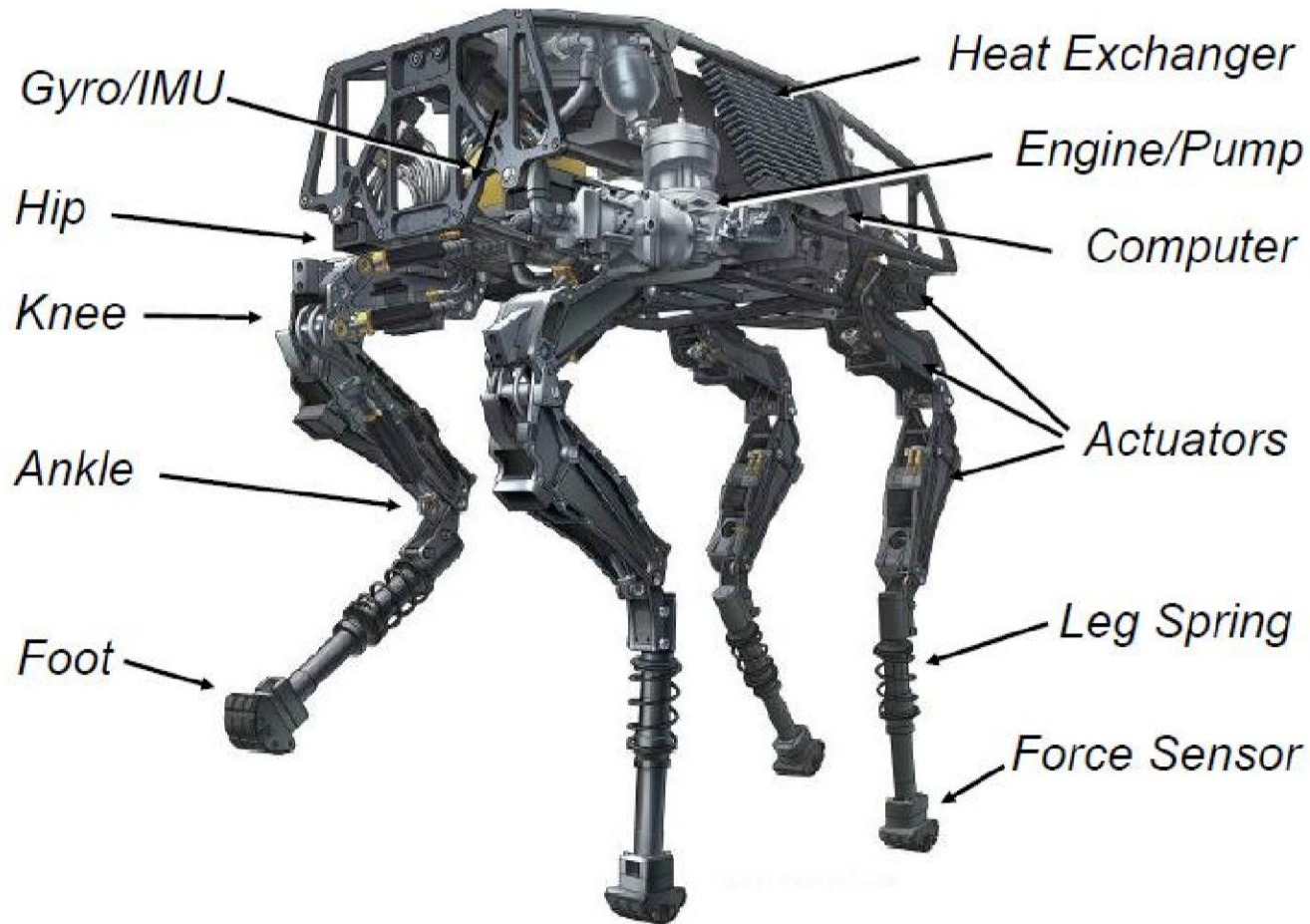
◇ 东京理工大学开发的四腿机器人 Titan VIII

- ◇ 重量: 19 kg
- ◇ 高度: 0.25 m
- ◇ 自由度: 4*3





4 腿行走机器人





4 腿行走机器人

◇ 大狗(Big dog)

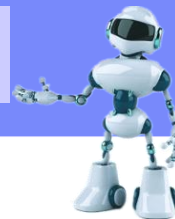




4 腿行走机器人

◆ Spot





6 腿行走机器人 (六足虫)

◆ 最为流行，因行走时的静态稳定性。

◆ 俄亥俄州立大学的人操纵六足机器

◆ 最大速度: 2.3 m/s

◆ 重量: 3.2 t

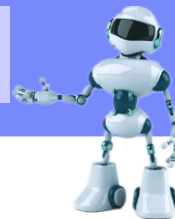
◆ 高度: 3 m

◆ 长度: 5.2 m

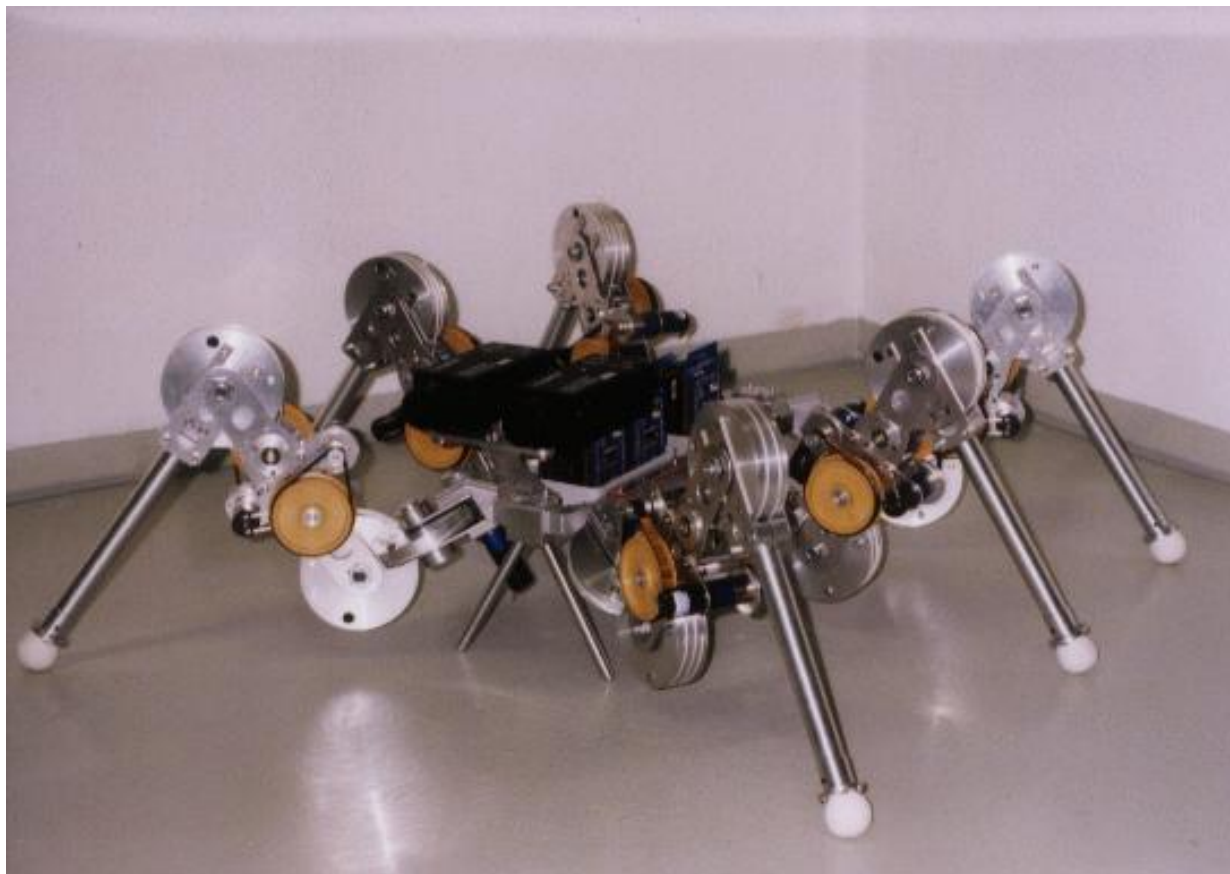
◆ 腿数: 6

◆ 自由度: $6*3$





6 腿行走机器人 (六足虫)



◇ 德国 Karlsruhe 大学开发的 Lauron II

- ◇ 最大速度: 0.5 m/s
- ◇ 重量: 6 kg
- ◇ 高度: 0.3 m
- ◇ 长度: 0.7 m
- ◇ 腿数: 6
- ◇ 自由度: 6×3
- ◇ 功耗: 10 W



轮式移动机器人

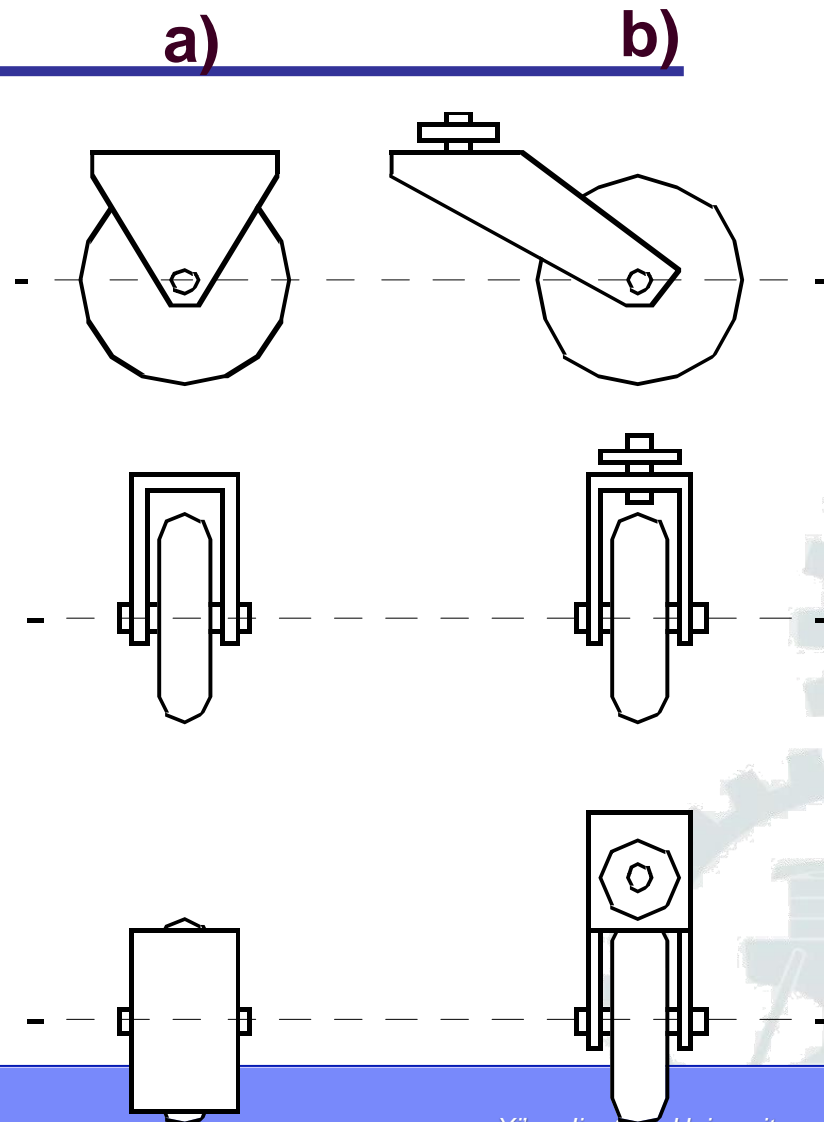
- ◇ 轮式对大部分应用都是最适合的
- ◇ 三轮足以保证稳定性
- ◇ 如果轮子数超过 3，需要有柔性悬挂装置
- ◇ 轮子数的选择与应用有关



4 种基本轮形

◇ a) 标准轮：两个自由度；
绕轮轴（电机驱动的）和
触地点转动

◇ b) 小脚轮：三个自由度；
绕轮轴、触地点和脚轮轴
旋转

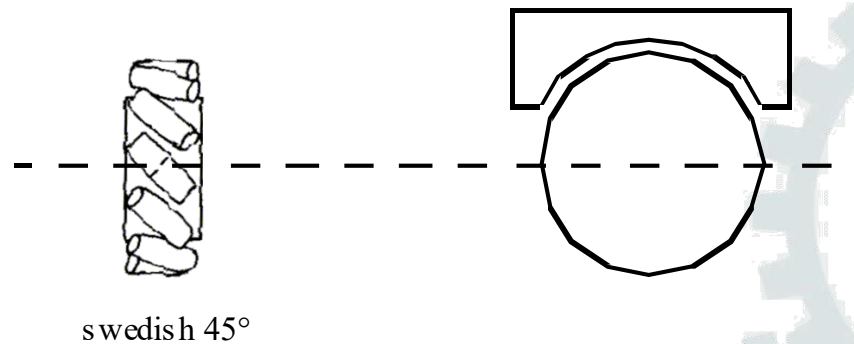
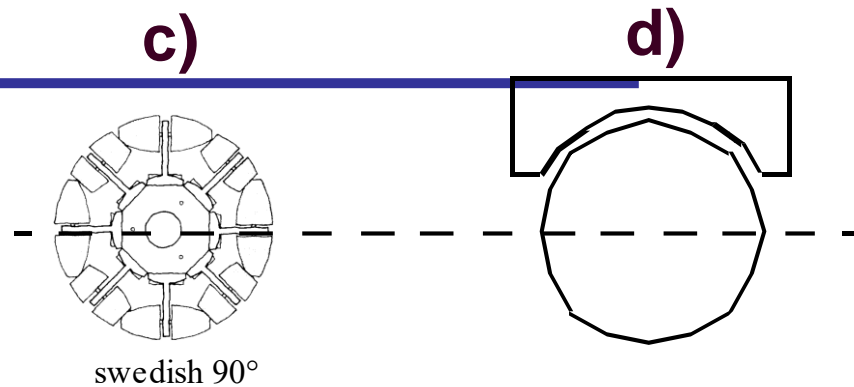




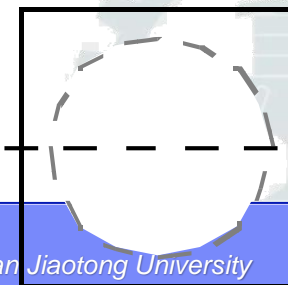
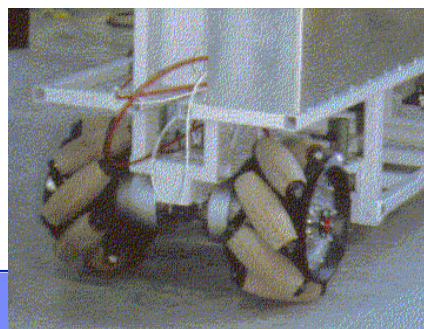
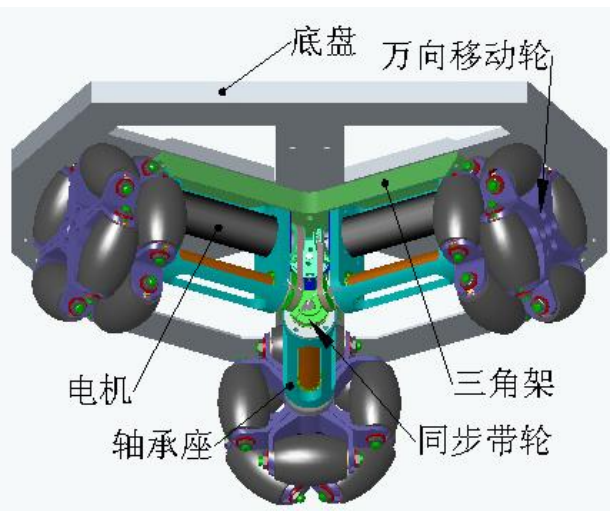
4 种基本轮形

◇ c) 瑞典轮：三个自由度；绕轮轴（电机驱动的）、辊子和触地点转动

◇ d) 球形轮：悬挂技术难以解决



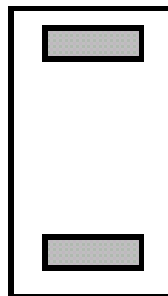
Caster Ball Wheel



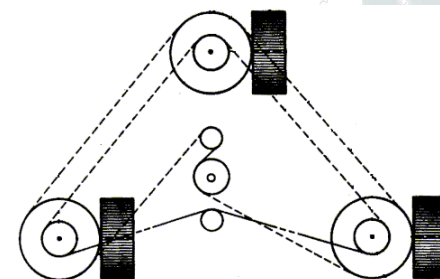
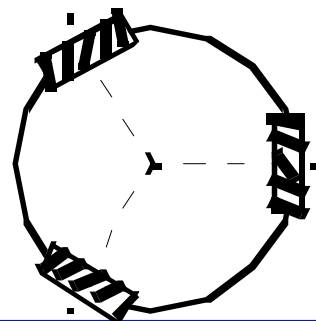
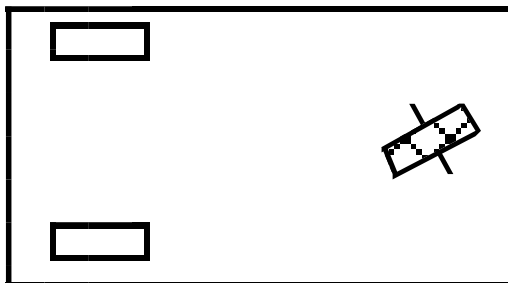
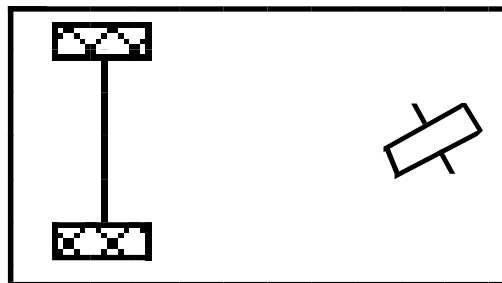
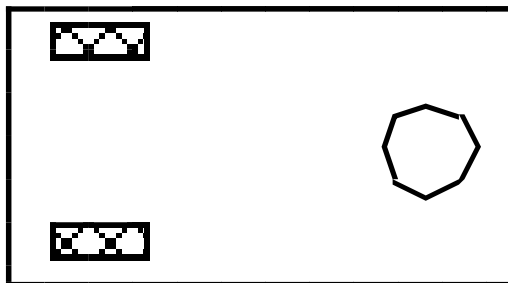


轮子的不同排列 I

◇ 两轮



◇ 三轮



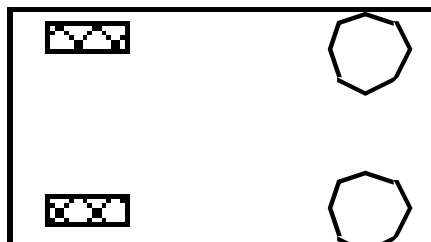
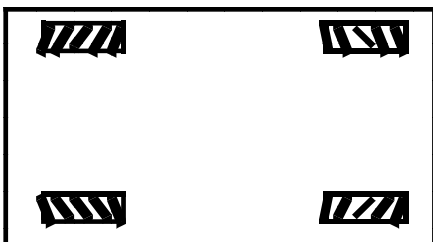
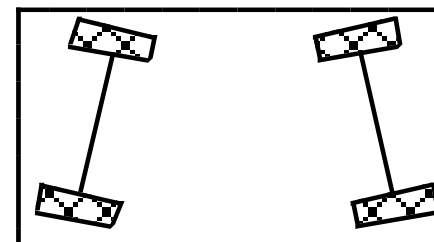
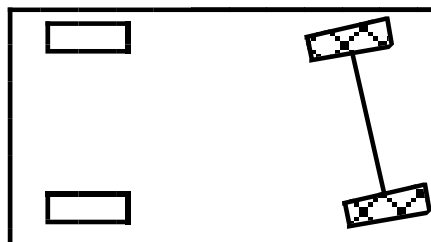
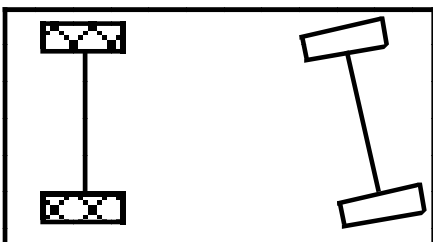
全向驱动

同步驱动

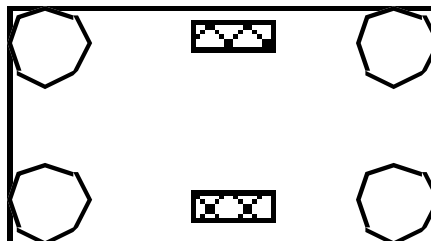
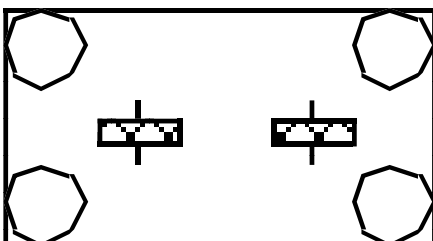


轮子的不同排列 II

◇ 四轮

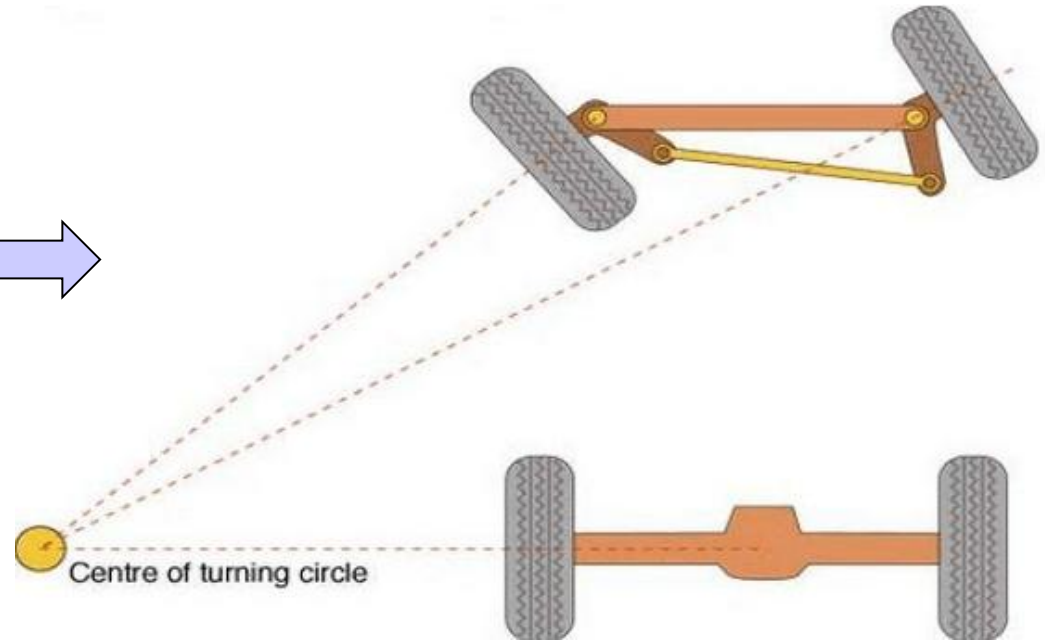
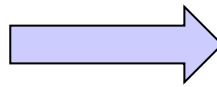
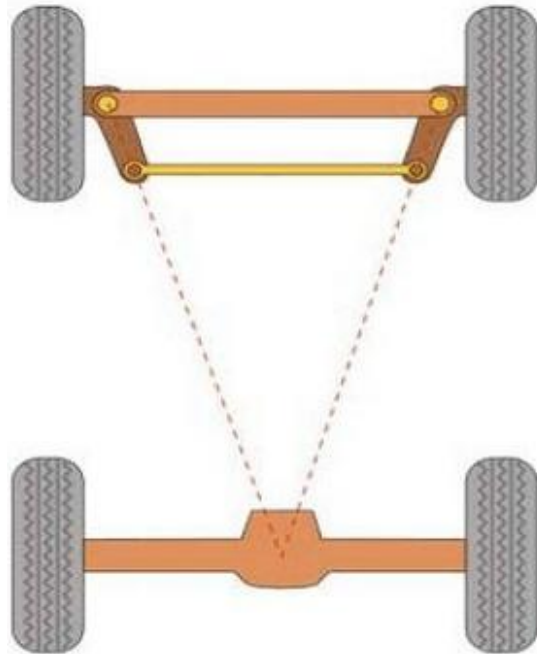


◇ 六轮





Ackerman 轮子配置





轮式机器人/车辆的特征

- ◇ 车辆的稳定性由 3 个轮子保证
 - ◇ 重心要落在轮子与地面的接触点形成的三角形内部。
- ◇ 4 或更多的轮子可以进一步改善稳定性
 - ◇ 然而，此时是超定的，需要有柔性悬挂装置。
- ◇ 直径大一些的轮子有利于越过较高的障碍物
 - ◇ 但是大轮需要高驱动力矩，或大减速箱。
- ◇ 大多数的轮子排列是非完整的 (见第 3 章)
 - ◇ 需要的控制更多些
- ◇ 由一个轮子同时实现驱动和转向两个功能，设计复杂，且对于里程表法会引入额外误差。



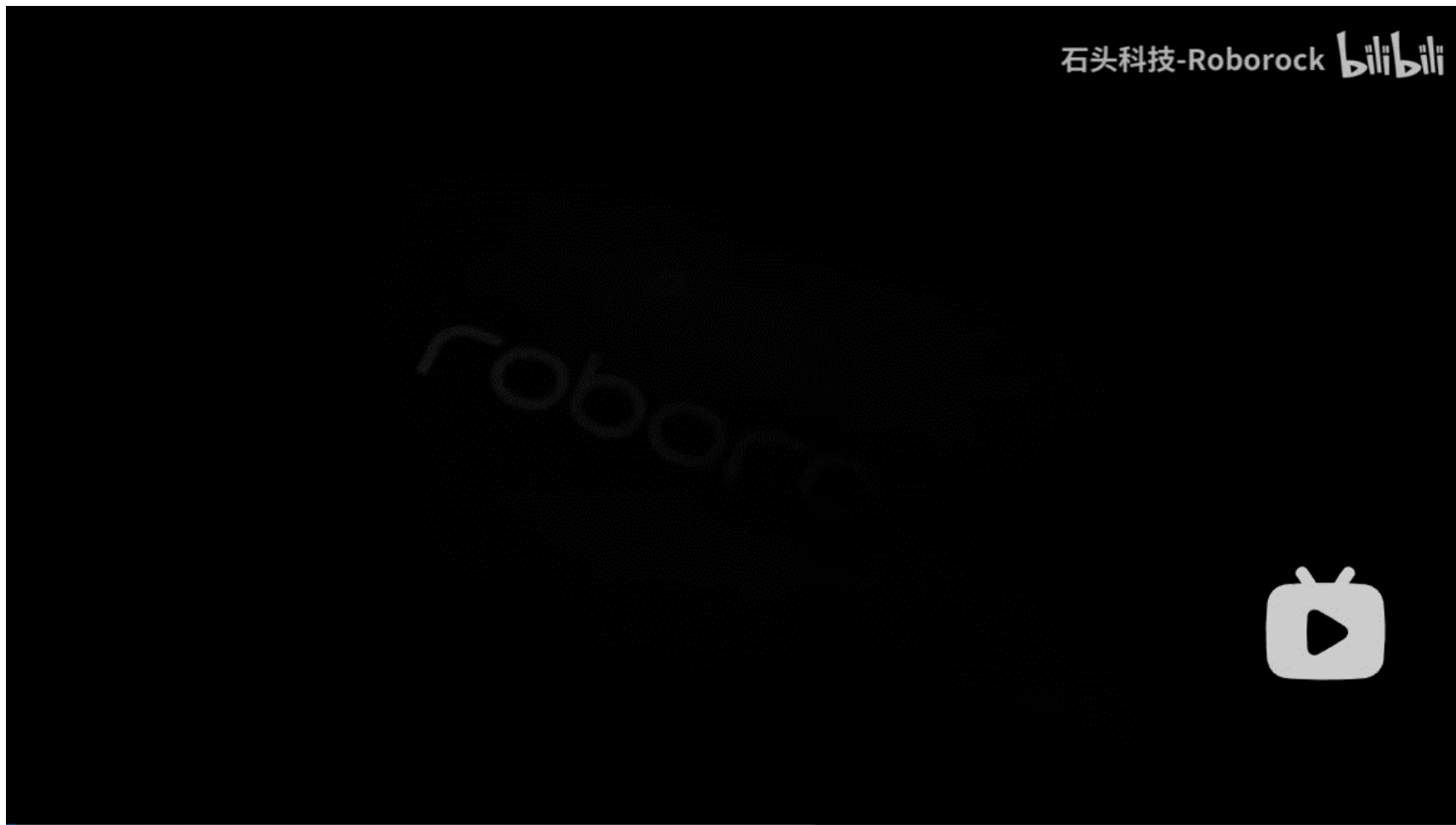
Cye, 两轮差分驱动机器人



◆ Cye, 由Probotics公司制造, 商业化家庭机器人, 能够室内吸尘和传递物品。



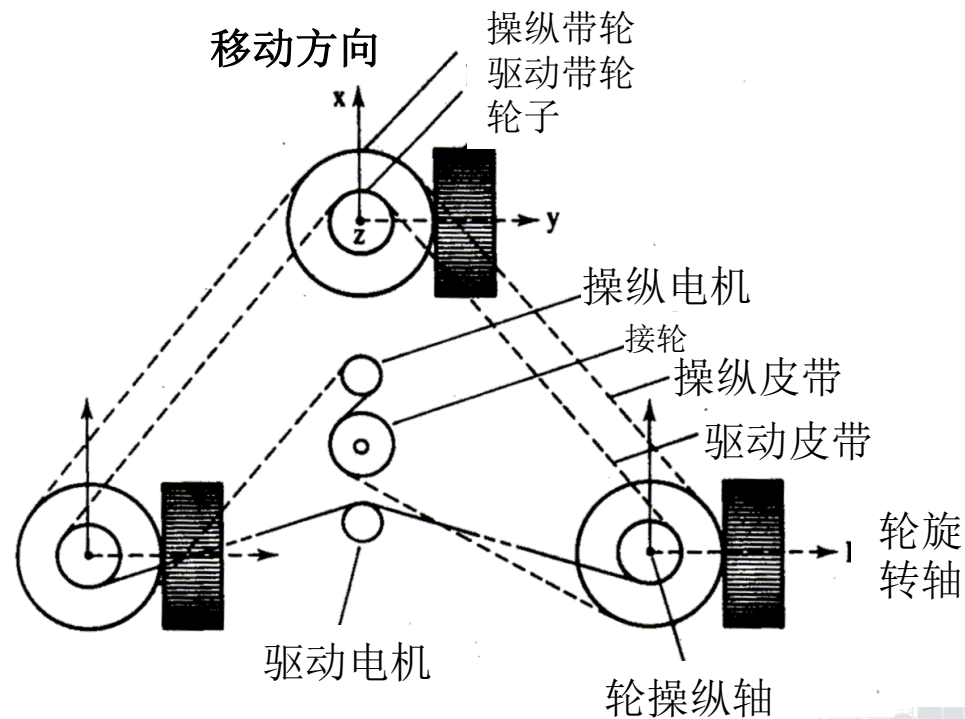
两轮差分驱动轮腿式机器人





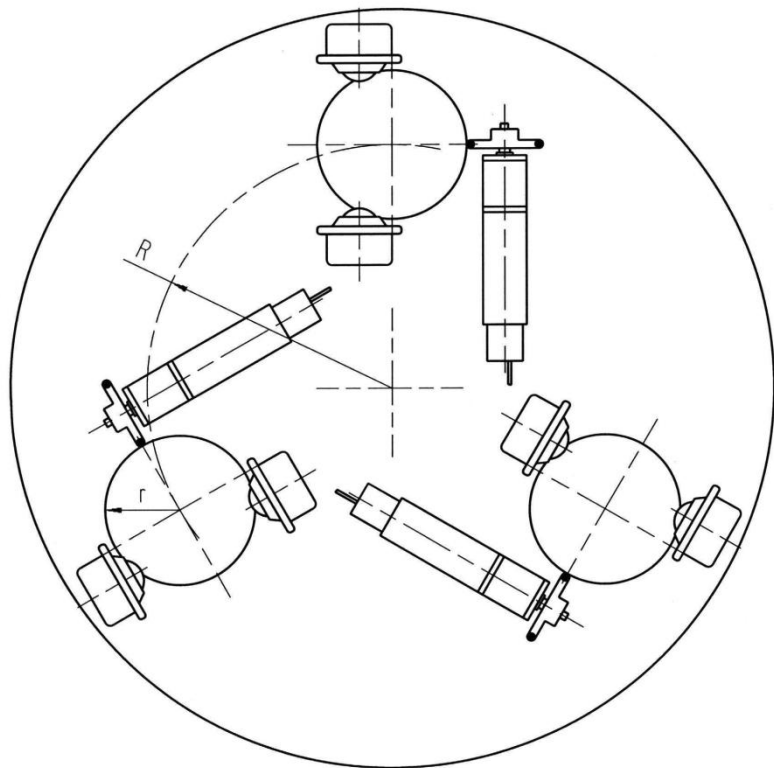
同步驱动

- ◆ 一台电动机同步驱动所有轮子
 - ◆ 使车辆产生移动线速度
- ◆ 第二台电动机同步操纵所有轮子（一致的）的朝向
 - ◆ 确定了车辆的移动方向
- ◆ 机器人主体在空间中的朝向总保持不变
 - ◆ 因此，不可能控制机器人主体的朝向。





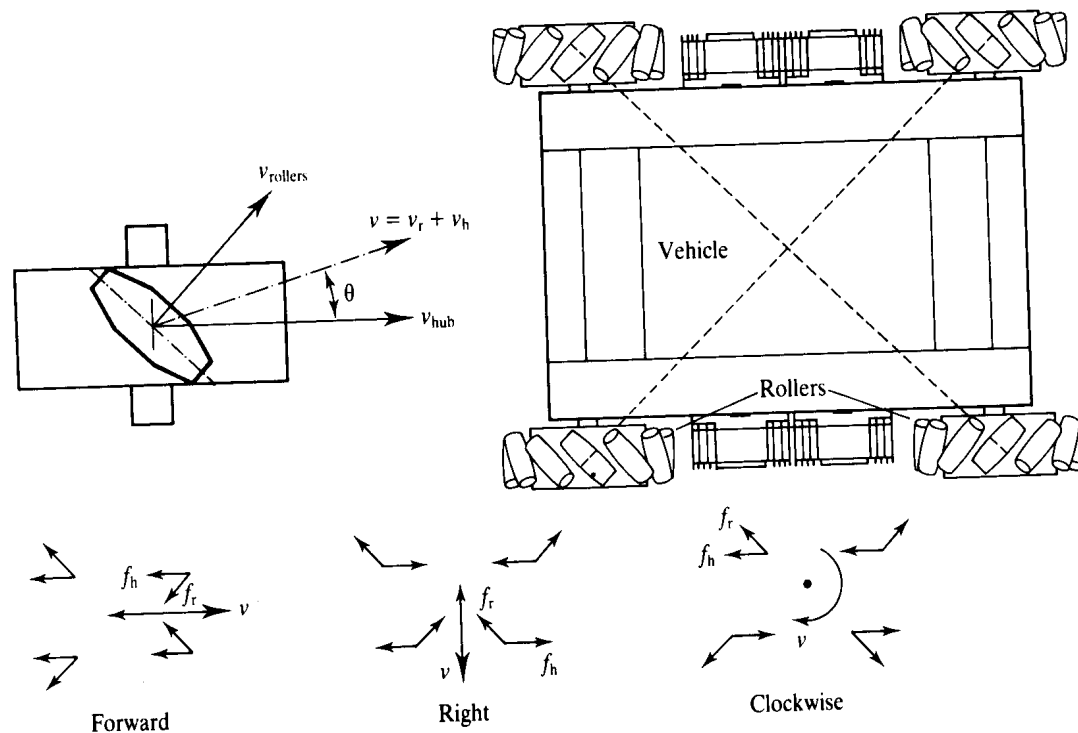
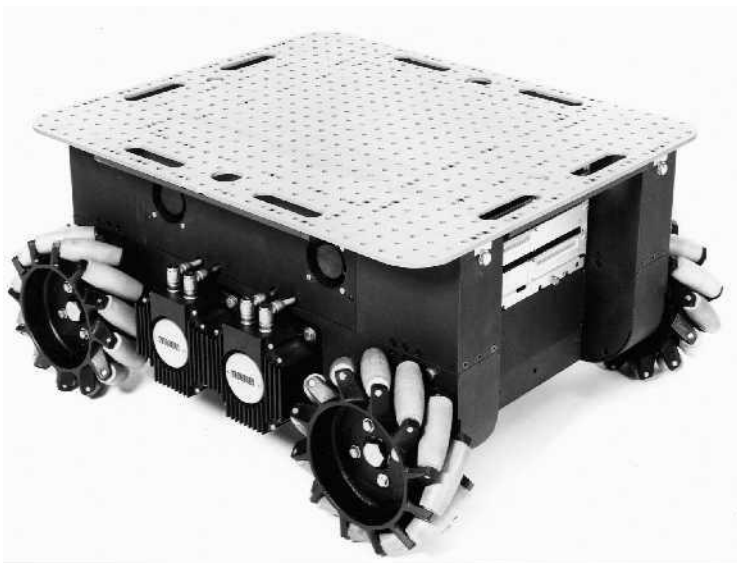
Tribolo, 用 3 个球轮实现全向驱动





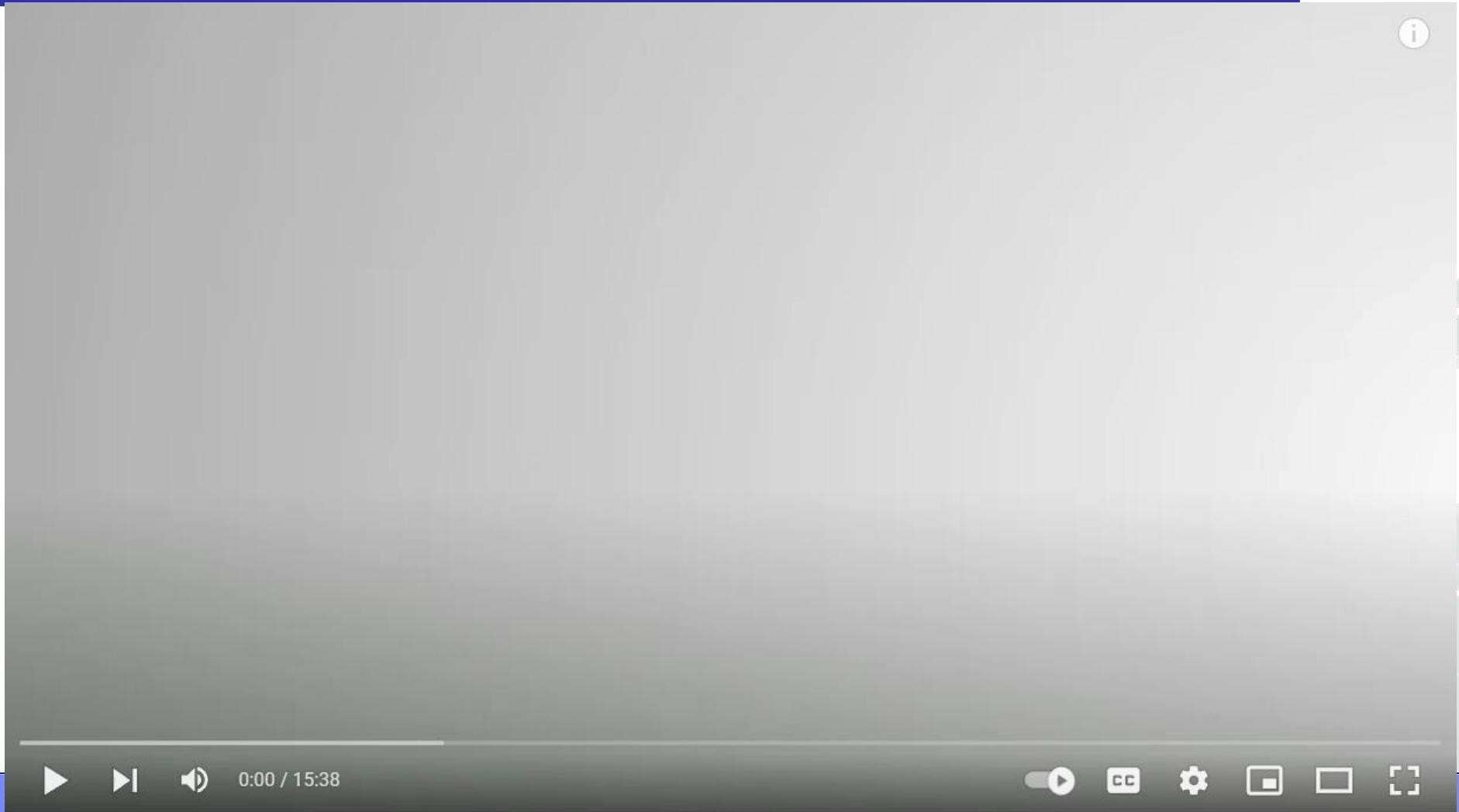
Uranus, CMU: 4 轮全向驱动

- ◇ 在平面上的运动具有 3 个自由度
 - ◇ 至少需要独立的控制三个轮子。
 - ◇ 将三个瑞典轮安排成一个三角形更好些。





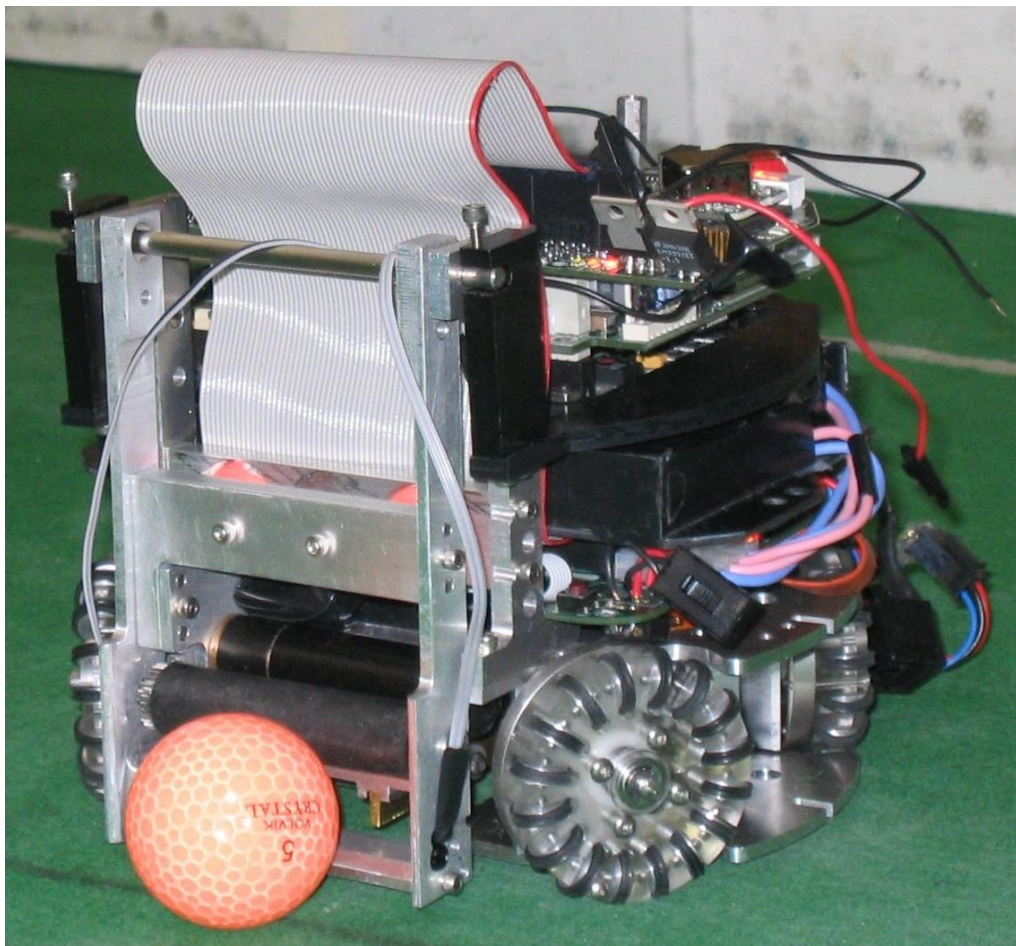
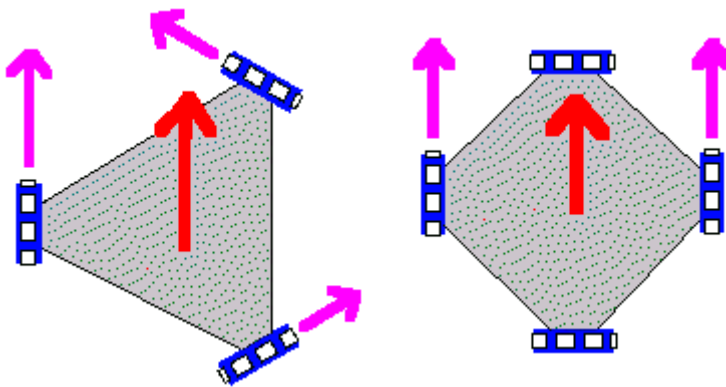
4 轮全向驱动





4 轮全向驱动

◇ 小型组足球机器人





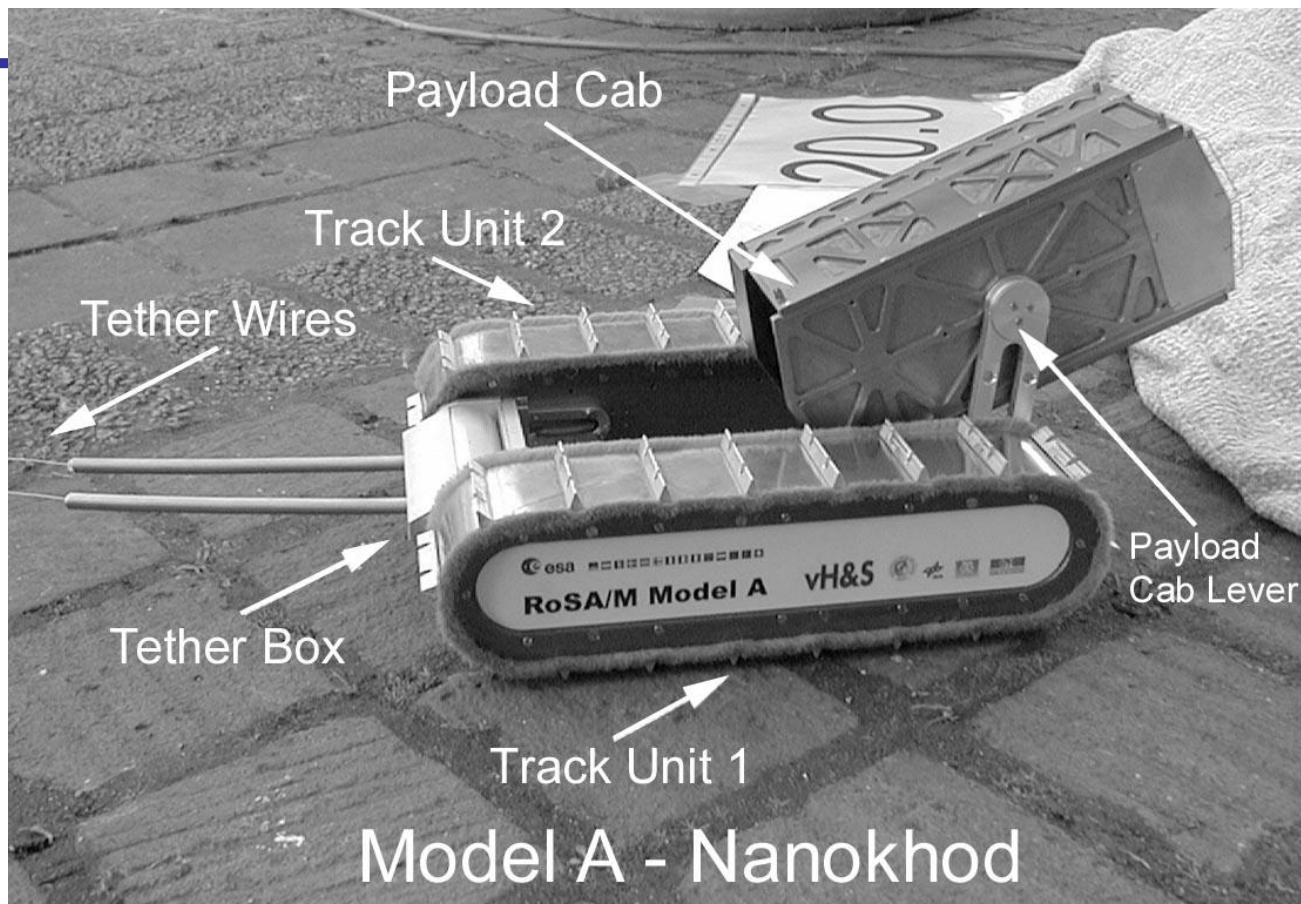
3 轮全向驱动

◇ 中型组足球机器人





履带



- ◆ **NANOKHOD II**, von Hoerner & Sulger GmbH 和 Max Planck 研究所为欧洲航天局开发，将可能送上火星。



用轮子攀爬和行走

◆ SpaceCat, 火星微型漫游者,
Mecanex Sa 和 EPFL 为欧洲航天局开发





SHRIMP, 具有卓越的攀爬能力的移动机器人

◇ 目标

- ◇ 针对粗糙地形的被动适应概念

◇ 结果：小虾（Shrimp）

◇ 6 轮

- ◇ 后方有一个固定轮
- ◇ 每边两个轮子安装在转架上
- ◇ 一个前轮安装在弹簧悬架上

◇ 机器人长约 60 cm

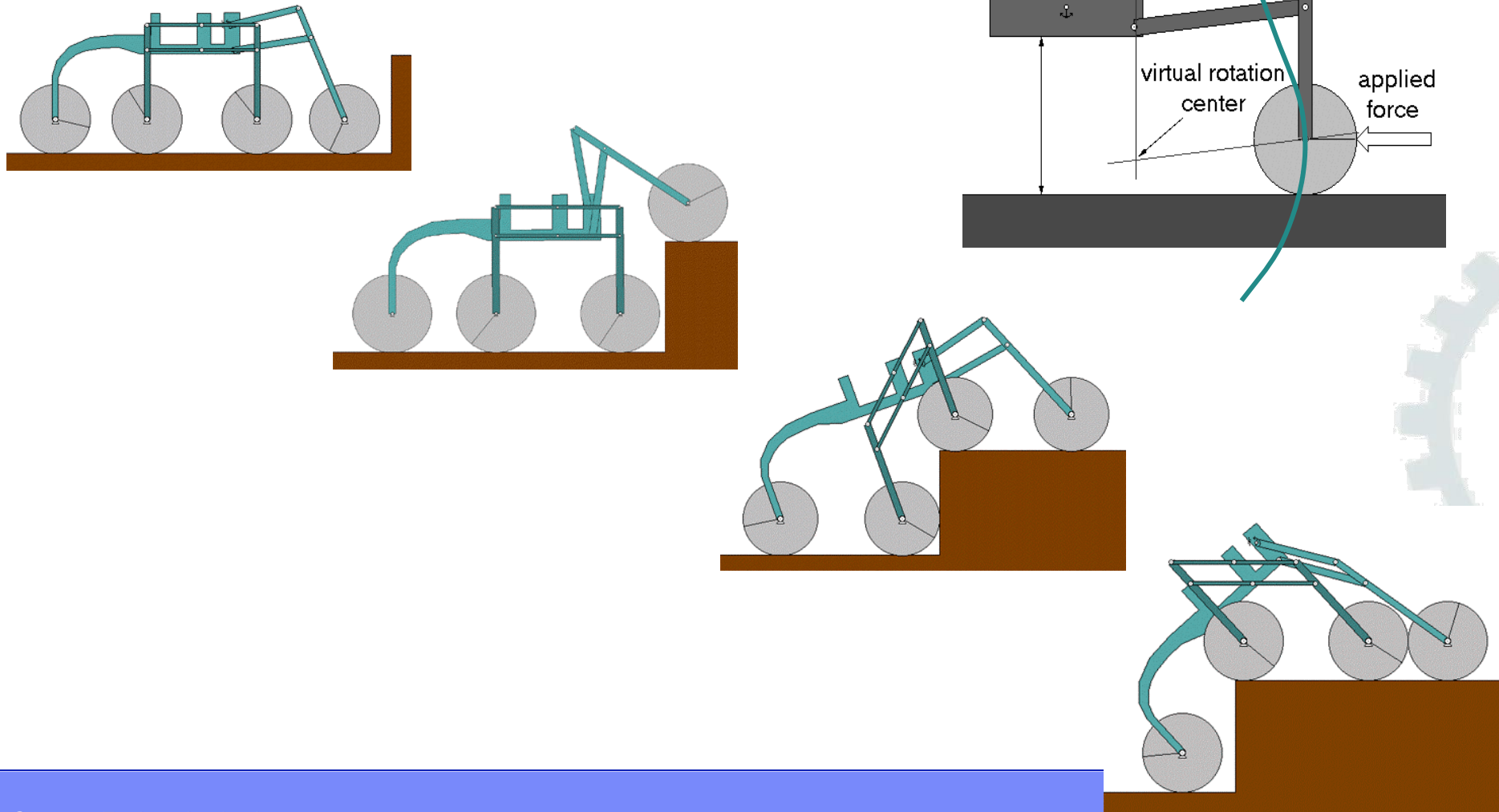
◇ 在粗糙地形上有很高的稳定性

◇ 可以越过高度为两倍轮子直径的障碍物





SHRIMP可以最理想地适应粗糙地形





“个人漫游者”





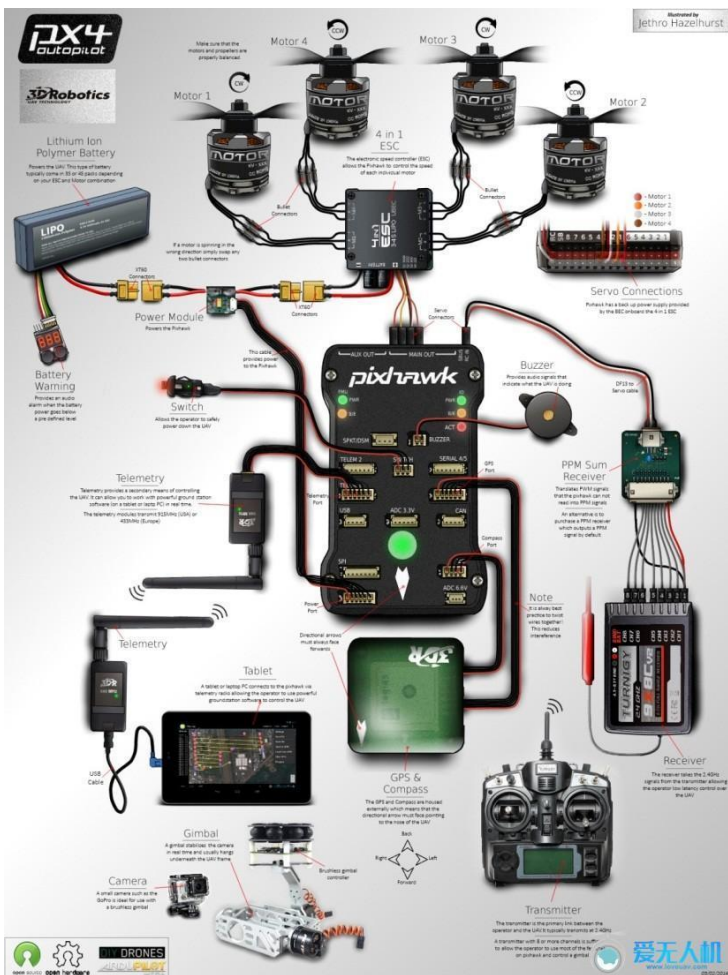
飞行机器人---四旋翼飞行器 (MAV)

- 典型的传统直升机配备有一个主转子和一个尾浆。他们是通过控制舵机来改变螺旋桨的桨距角，从而控制直升机的姿态和位置。
- 四旋翼飞行器与此不同，是通过调节四个电机转速来改变旋翼转速，实现升力的变化，从而控制飞行器的姿态和位置。
- 由于飞行器是通过改变旋翼转速实现升力变化，这样会导致其动力不稳定，所以需要一种能够长期确保稳定的控制方法。
- 欠驱动系统





旋翼飞控



- 左图为著名的开源飞控**Pixhawk**的系统分解图，中间最明显的则是飞控。
- 飞控采集板载以及外接的各种传感器信息，然后通过微处理器进行实时处理和计算得到飞行器的姿态和位置，结合无线传输接收到的控制指令，再将控制量输出到电机，从而达到控制飞行器飞行状态的目的。



旋翼飞控

◆ MEMS三轴陀螺仪，MEMS加速度传感器。

- ◆ 越来越多的消费级电子产品使用了这些MEMS传感器。加速度传感器不仅能测量出物体的运动加速度，还能测量出地球上无时无刻不存在的重力加速度。
- ◆ 简单的理解：对测量得到的重力加速度进行一定计算，便能得出此时飞行器相对于水平面的倾角。利用特定的算法结合陀螺仪和加速度测量到的数据，就可以计算出飞行器此时相对于水平面的姿态，从而实现自稳控制，即自动保持与水平面平行的飞行姿态。



旋翼飞控

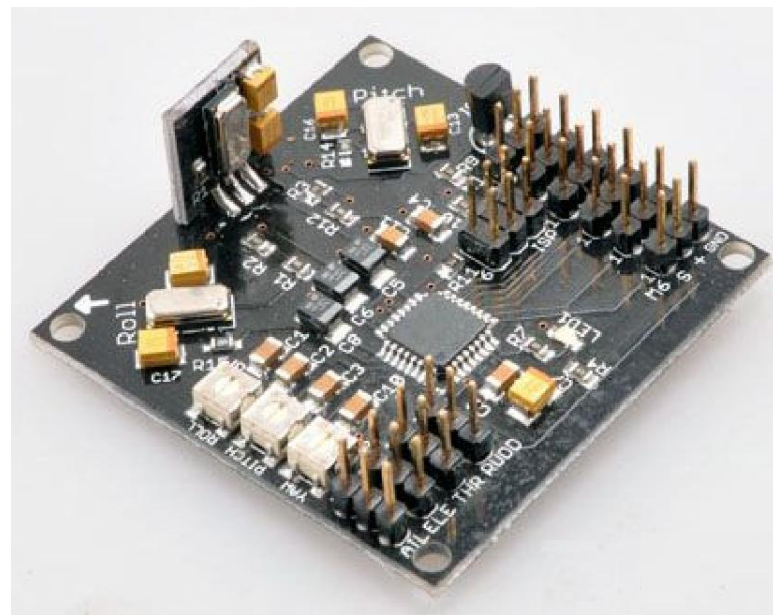
◆ MEMS磁力计与MEMS气压计

- ◆ 地球上存在着恒定的磁场，磁力计测量得到三个轴的磁场强度，经过计算后使飞行器能够感知自身的飞行朝向，这是实现自主导航的基础。
- ◆ 气压计则可以测量大气压强，因为大气层内大气压强随着高度增加而逐渐递减，根据这个关系便可以将测量到的大气压强转换为高度，目前精度最高的消费级MEMS气压计传感器分辨率可以达到10厘米。



旋翼飞控

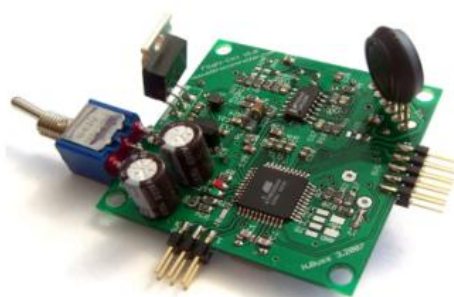
- ◆ 法国开源项目**KK飞控**便是此类型的一个代表作。KK飞控软硬件全开源，采用atmega8单片机和三个单轴的陀螺仪，硬件简单且成本非常低廉，因此早期受到了很多玩家的欢迎。程序采用汇编编写，移植性和可读性都较差。





旋翼飞控

- ◆ 德国的Microdrones公司推出了md-200四旋翼飞行器，兼备极佳的稳定性和有效载荷能力，逐渐向全世界的民用工业领域推广开来。
- ◆ 德国还诞生了一款影响重大的开源飞控——**Mikrokopter (MK)**，被无数后来者模仿和学习。





旋翼飞控

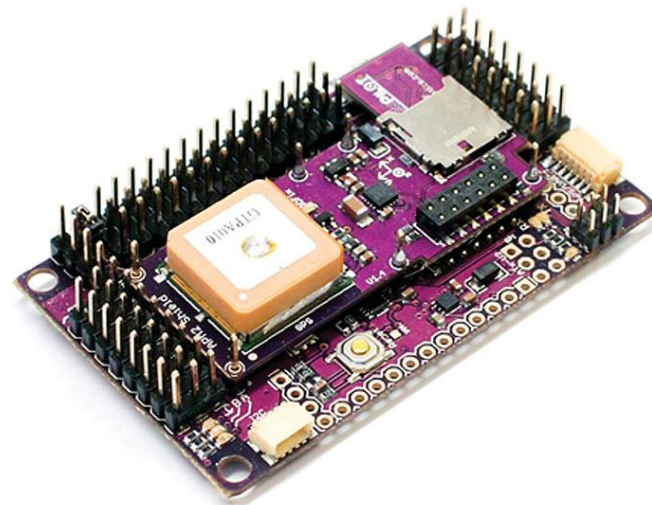
- ◆ 在2006-2008年这个时期，MEMS传感器的零售渠道是非常少的，意味着很难通过普通渠道购买到这些传感器。
- ◆ MWC飞控：法国的一个航模爱好者Alex想到了一个办法，他从任天堂游戏机手柄中拆卸出了陀螺仪和加速度计模块，然后装到自己制作的飞控板上，来控制自己的三轴飞行器。Alex把自己的这个项目开源了，叫MultiWii，也就是后来著名的MWC飞控。





旋翼飞控

- ◇ 同时期，美国《连线》杂志前主编克里斯·安德森在家用乐高DIY一个固定翼飞行器的时候建立了diydrones社区，在社区上认识了许多来自各国的同好，其中有一个19岁的墨西哥极客小伙Jordi，高中毕业在家，自己鼓捣了很多有趣的东西。安德森发现Jordi是一个很有想法也具有相当实力的人，于是2009年的时候安德森赞助了一笔钱，两个人一起创建了3D Robotics（3DR）公司，公司建立在墨西哥，初期主要由Jordi来运营。
- ◇ 2010年，3DR公司发布了采用更强大的mega2560单片机的**APM飞控**，其软硬件全部开源，这款飞控得到了diydrones社区上众多高手的不断完善和改进，最终成为了目前最流行，功能最强大的开源飞控。





旋翼飞控

- ◇ 来自中国深圳的大疆创新公司（DJI）发布了公司旗下首款多旋翼商业飞控WooKong-M，中文名悟空。大疆公司为香港科技大学研究生毕业的汪滔在2006年创立，在推出悟空之前，DJI已经于小型直升机飞控领域深耕数年。
- ◇ 悟空飞控为当时国内外多旋翼消费市场上难得一见的高端飞控，包含了一个独立的工业级IMU传感器模块与一个集成电子罗盘的GPS模块，具有极佳的稳定性和自主飞行能力，推出后被迅速应用于许多用于航拍的多旋翼飞行器。





旋翼飞控

- ◆ **OpenPilot**是由OpenPilot社区于2009年推出的飞控项目，旨在为社会提供低成本但功能强大的稳定型自动驾驶仪。这个项目由两部分组成，包括OpenPilot飞控与其相配套的软件。其中，飞控的固件部分由C语言编写，而地面站则用C++编写。
- ◆ OpenPilot拥有众多的硬件设计，其中**CC3D**是最流行的飞控，此飞控板只有一块STM32F103单片机和MPU6000传感器，但拥有优秀的稳定性和良好的操作手感，由于用料简单因此售价也非常便宜，被大量用于穿越机上。





旋翼飞控

- ◆ 2012年，MultiWii论坛上发布了一个将MWC代码移植到STM32F103单片机上的项目，命名为Baseflight，成为了MWC在32位单片机平台上的一个分支，其飞控板称之为Naze32。其硬件设计源自于中国的一款“MMC10飞控”（前身为FF飞控），后被一位日本人对其进行优化改良，便有了**Naze32飞控**。

后来又有人在Baseflight的算法基础上对程序架构进行了改善，形成了Baseflight的一个分支：**Cleanflight**，支持包括Naze32、CC3D在内的数款飞控板。





旋翼飞控

- ◆ 2013年，3DR联合苏黎世联邦工业学院（ETH）发布了新一代的开源飞控：**Pixhawk**。Pixhawk采用了STM32F4单片机，高达168MHz的主频带来了更好的运算性能，传感器方面采用了双冗余度方案，即双份陀螺仪，双份加速度计。Pixhawk有着自己的一套新的算法和基于NuttX实时操作系统的运行体系，但同时也兼容前一代APM飞控的代码。





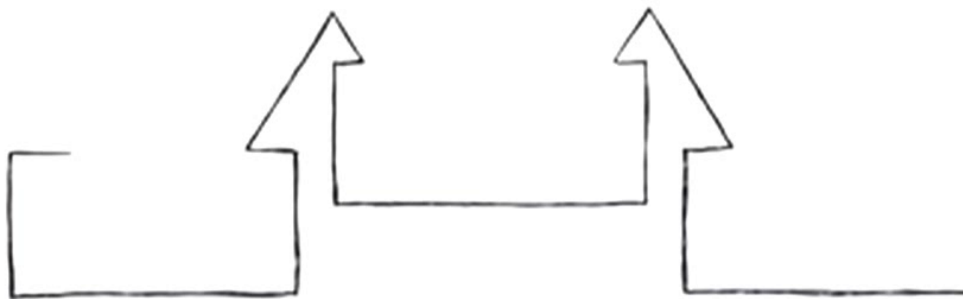
脑控飞行机器人---四旋翼飞行器

Mind Over Mechanics



屏幕录像专家 未注册

按 Esc 退出全屏模式。





领先无人机

- ◆ 2015年,一则来自伊拉克的战场视频显示,中国生产的**彩虹4号**武装无人机已经在伊拉克投入实战,用于打击极端组织“伊斯兰国(IS)”武装分子,彩虹-4无人机是由中国航天科技集团公司自主研发,在彩虹-3基础上新研发的一种无人驾驶飞行器,飞行高度达7-8千米,飞行速度300公里/小时,最远航程能达到3500公里,飞行时长40多小时。





领先无人机

- ◆ **全球鹰无人机（美国）** 由诺斯洛普·格鲁门公司研发的RQ-4A全球鹰无人机是世界最顶级的无人机之一，是目前世界上飞行时间最长、距离最远、高度最高的无人机，至今仍保持着世界无人机领域的多项最高纪录，可从美国本土起飞到全球任何地点执行侦察任务。
- ◆ 诺斯洛普·格鲁门公司 (Northrop Grumman) 成立于1994年，是诺斯洛普公司收购格鲁门公司后组成的。这家公司是世界第4大军工生产厂商(2007年)，世界上最大的雷达制造商和最大的海军船只制造商。





领先无人机

- ◆ **雷电之神（英国）** Taranis是由英国BAE系统公司参与研发的首架高科技隐形无人飞机，Taranis意为雷电之神，能超音速飞行，并能自动捕捉目标。由于采用单翼隐身设计，该无人机能逃避雷达侦测，外观酷似电影《星球大战》中的飞行器。
- ◆ 英国BAE系统公司是世界最大的军品制造公司之一，是1999年11月由英国航空航天公司(BAe)和马可尼电子系统公司(Marconi Electronic Systems)合并而成的，其业务范围主要有飞机、军用电子、反潜武器(ASW)、C3I系统、导弹等9个领域。





领先无人机

- ◆ **MQ-1捕食者无人机**（美国）美国通用原子公司早在20世纪80年代就登上无人机事业舞台，第一架“捕食者”在1994年年中首飞，现在已发展为“捕食者-A”、“捕食者-B”、“捕食者-C”等系列，机长8.27米，翼展14.87米，最大活动半径3700公里，最大飞行时速240公里，可发射两枚AGM-114地狱火飞弹。曾击毙数十名恐怖分子，包括几名塔利班领导人。





领先无人机

◆ 苍鹭无人机（以色列）“苍鹭”是目前以色列军方最大的无人机，由以色列航空工业公司(IAI)历经10年研发成功。“苍鹭”的翼展16.6米，大小和波音737客机相当。航程可覆盖包括伊朗在内的海湾地区，能持续飞行30多个小时。它的主要用途是监控与侦察，同时还能运载其它设备以执行不同的任务。

◆ 以色列航空工业公司(IAI)从1968年成为国有企业，也是以色列最大的无人机制造商，在数十年的发展中，陆续研发出了“苍鹭”、“哈比”等世界顶尖的无人机。





领先无人机

- ◆ **哈比无人机（以色列）** 哈比无人机（IAI Harpy）同样是由以色列航空工业公司（IAI）在20世纪90年代研制的，可以自主对雷达进行攻击，因此被称为“空中女妖”和“雷达杀手”。





领先无人机

- ◆ **火力侦察兵（美国）** 诺斯罗普·格鲁门公司研制的MQ-8B“火力侦察兵”是一款无人垂直起飞和着陆的飞机系统，旨在为美军提供情报监视、目标截获和侦察、空中火力支援、激光指示和战斗管理服务。它可以从战舰甲板，或者很狭窄的平地上起飞，对地面、空中和海上力量进行支援作战。美军部署在阿富汗的MQ-8B“火力侦察兵”主要用来打击路边的简易爆炸装置。携带的武器包括“地狱火”导弹、“蝰蛇打击”激光制导滑翔弹、以及先进的精确杀伤武器系统，70毫米激光制导火箭弹等，MQ-8B“火力侦察兵”的有效载荷为136千克，最大航程约1104千米，续航力7.75小时。





领先无人机

- ◆ **翼龙无人机（中国）** 2012年11月13日，中国航空工业集团研发出一架“翼龙”无人机，此架无人机也奠定了中航工业集团在中国无人机的地位。翼龙无人机是一架中低空、军民两用、长航时多用途无人机。可执行监视、侦查及对地攻击任务等任务，也可用于维稳、反恐、边界巡逻等。“翼龙”无人机用途和技术指标与美国著名的MQ-1“捕食者”无人机相似，属当今世界最先进无人机之一。





总结

1. 移动机器人的各种运动方式

腿式运动

轮式运动

2. 运动稳定性的概念

静态稳定性

动态稳定性

3. 腿式移动机器人的种类以及自由度

4. 各种轮式移动机器人以及相应的轮的种类，以及分布方式

5. 飞行机器人