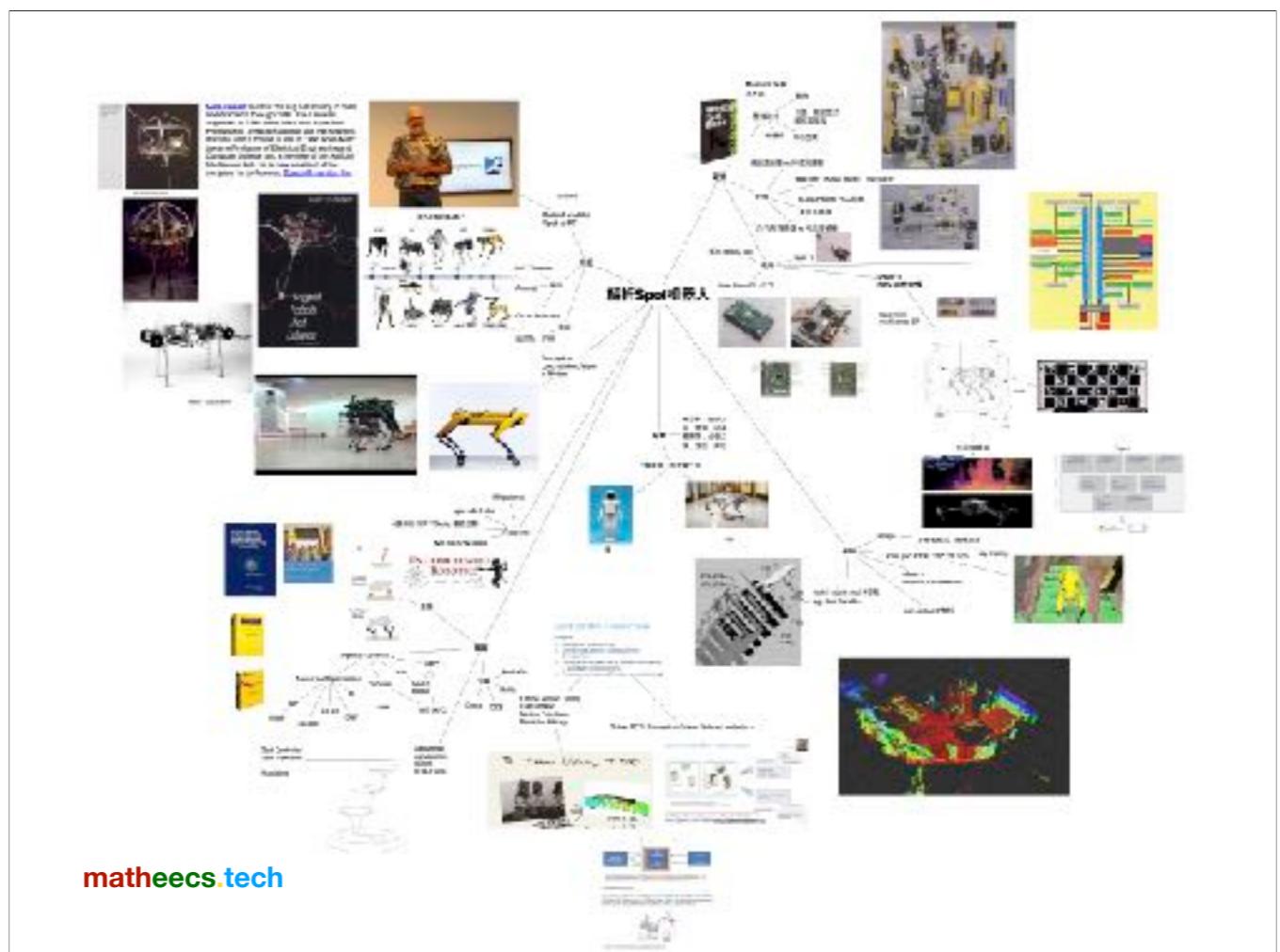


# 解析 Spot 机器人



大家好，我是张吉祥，今天分享的主题是，解析Spot机器人，左下方地址是我的个人主页，今天分享的所有内容会上传到B站和GitHub。这是分享的目的是，尽可能深入地介绍Spot四足机器人的相关技术，引导入门足式机器人领域的小伙伴，提供一些研究思路，推动国内四足机器人技术交流和发展



我画了一个思维导图作为分享内容的大纲，内容分为5个小节，分别是导论、硬件、感知、规划，最后是总结思考

# 导论

那么开始第一节的导论部分，介绍机器人的发展历史

## Marc Raibert



我不得不先拉出一位机器人大牛 Marc Raibert，他也是波士顿动力公司创始人



## Leg Laboratory

1980

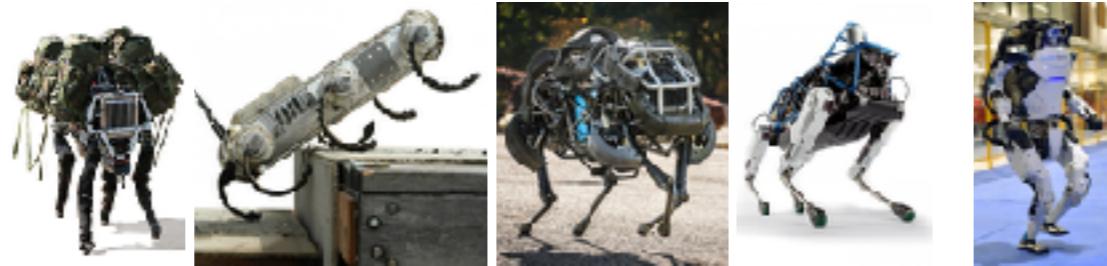
@CMU

1986

@MIT

1992

## Boston Dynamics



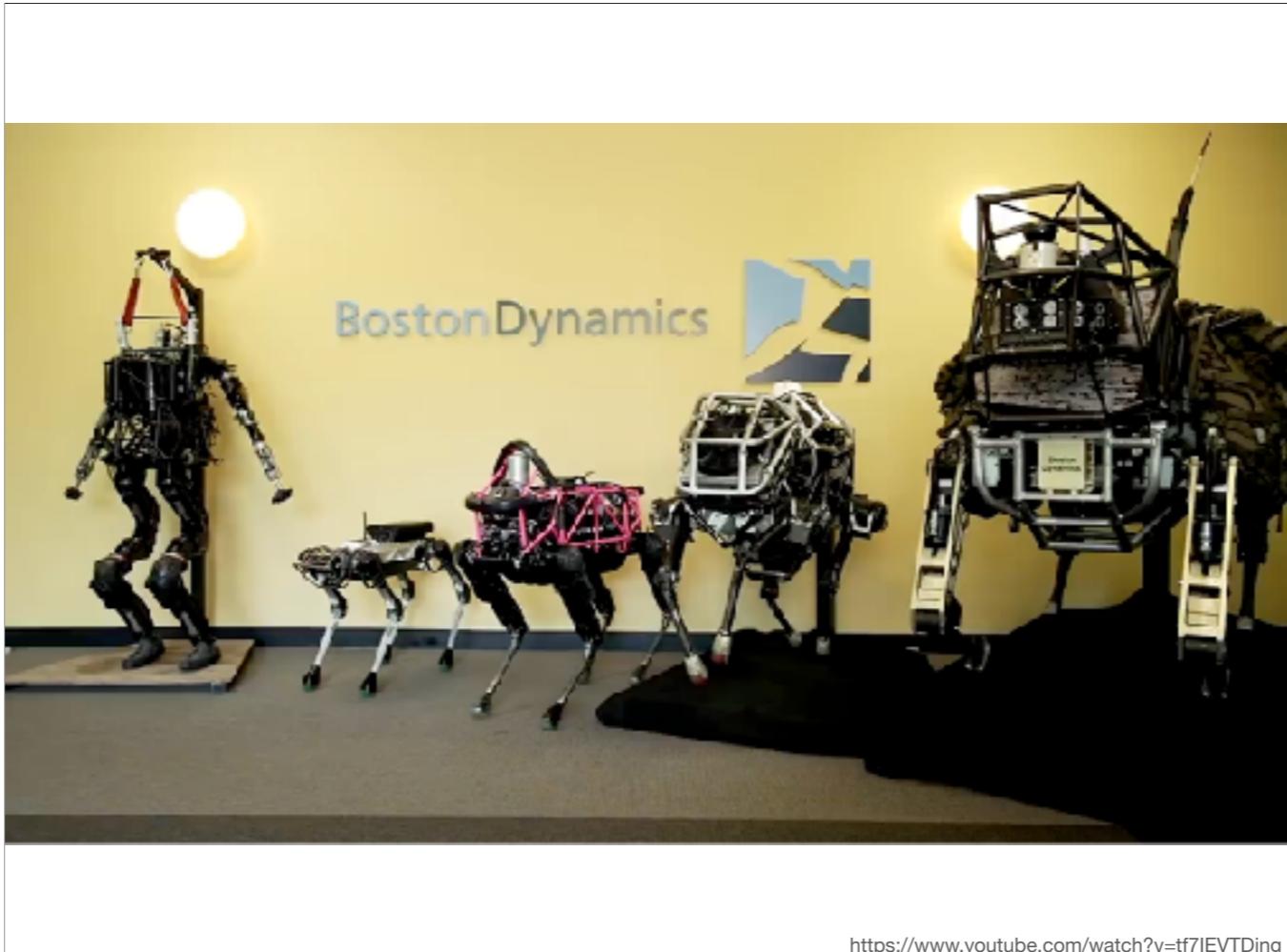
Raibert 1980年，也就是40多年前，他在卡耐基梅隆大学CMU建立了Leg Laboratory实验室，1986年时，他把实验室搬到了麻省理工大学MIT，然后于1992年，刚好30年前，创立了今天的波士顿动力公司。他在实验室里研发出了单腿跳跃机器人、双腿、四足跳跃机器人，并出版了一本能真正体现出足式机器人控制美学的书 *Legged Robots That Balance*，今天来看这本书依然经典。

公司成立之后，他又带领团队研发出了BigDog、Atlas、Spot等顶尖足式机器人平台



<https://www.youtube.com/watch?v=XFXj81mvInc>

视频展示了80年代在实验室研发的部分机器人。如果你看到视频开始部分的单腿机器人是无比兴奋，说明你成功踏入了足式机器人领域



<https://www.youtube.com/watch?v=tf7IEVTDjng>

Spot经过了多次迭代，从2015年的Spot Classic (C位) ， 到2016年的Spot Mini (视频中最小的一个) ， 最终2017年才研发出商业版的Spot



商业版的Spot机器人包括图中的所有设备，一台Spot机器人，遥控手柄，电池和充电器、保护箱和一块相机标定板

# 硬件篇

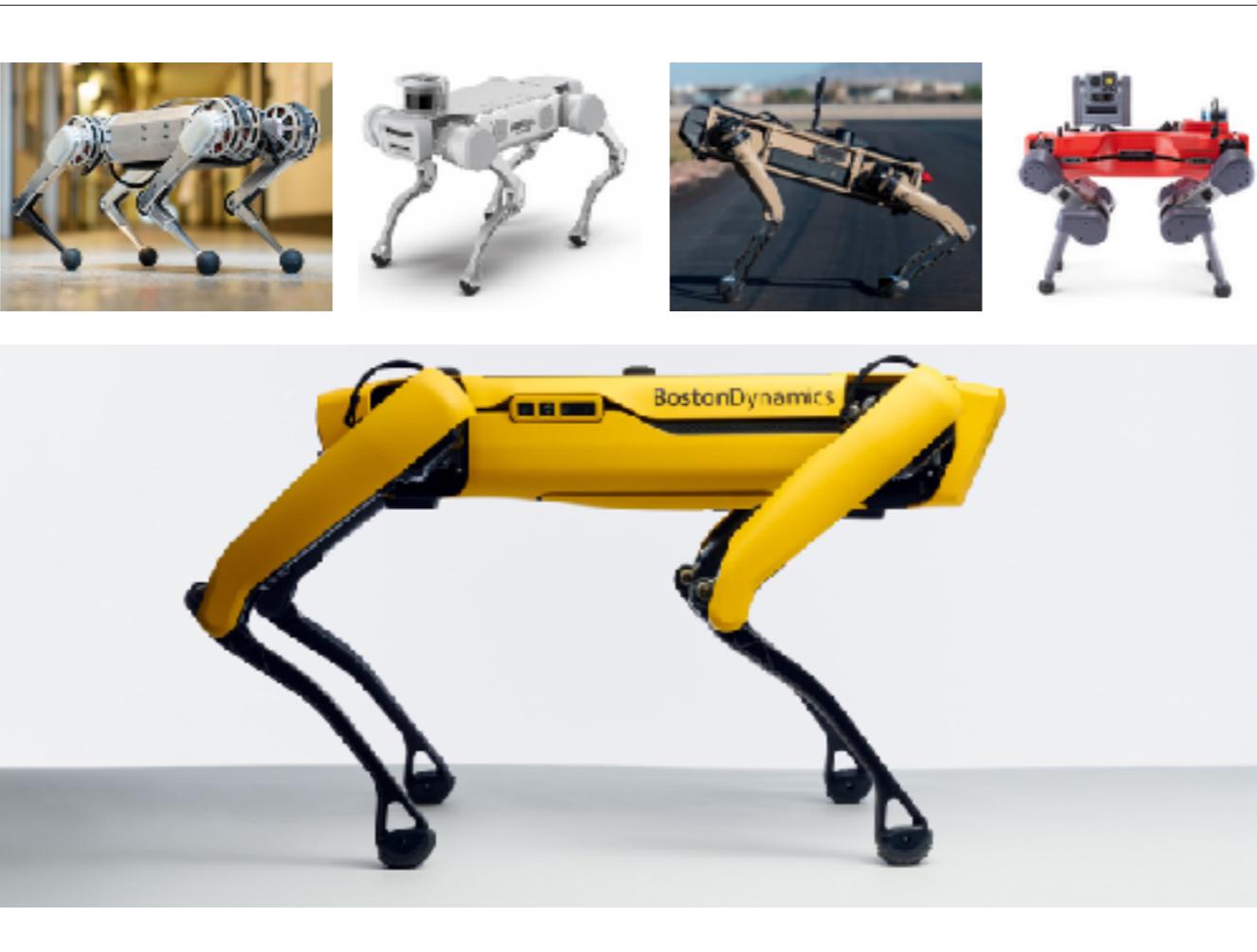
我打算从三个方面介绍Spot机器人的核心技术，分别是硬件、感知算法和规划算法。先介绍硬件部分



<b>第1章 Spot 概要</b>	<b>第5章 メカ部品</b>
1-1 全体像と機器	5-1 レーザードライバ/アエンディング機械装置
◎全体像	5-2 Kneeドライブユニット ◎Kneeドライブユニット ◎モードセル基板 ◎コマフリショナルロッド用基板 ◎直角アクチュエーターステップ
1-2 操作方法	5-3 YMドライブユニット ◎YMドライブ基板 ◎YMドライブ用トルクセンサー基板 ◎ハーモニックドライブ ◎直角駆動部品
◎操作方法と接続方法 ◎位置コントローラによる操作 ◎PCによる操作	5-4 X轴ドライブユニット ◎X軸ドライブ基板
1-3 外部接続端子	
◎外部端子	
◎トヨタインダフェース	
◎接続用ペイロード	
<b>第2章 ソフトウェア開発基盤</b>	<b>第6章 エレクトロニクス部品</b>
2-1 サービス	6-1 可変周波数 ◎振動位置 ◎ハーモニクス ◎アンテナ
◎自動キルス	6-2 構成部品 ◎コネクションカード ◎ファン
◎サービス	6-3 マインコンピューター ◎接続位置と接続方法 ◎CPU基板 ◎温度センサー
◎GraphStar	6-4 レザードライバセンブリ ◎接続位置と接続方法 ◎モードセル基板 ◎トルクセンサー基板 ◎エンコーダー基板
◎DistroGraphy	6-5 電池パック ◎外装と仕様 ◎内部構造
◎State	6-6 コントローラ ◎外装と仕様 ◎内部構造
◎Data	
◎Parameters	
2-3 プログラミング	
◎プログラミング環境	
<b>第3章 動作モデル</b>	<b>第7章 ベイロード</b>
3-1 走行動作	7-1 入手したベイロード ◎機器
◎運動部品構成 ◎歩行方法	7-2 Spot Cam ◎外装 ◎基板接合位置 ◎基板基板
3-2 跳躍動作	7-3 EDGE CPU ◎外装 ◎基板接合位置 ◎基板基板
◎通常が起こるケース	7-4 LiDAR ◎外装 ◎基板接合位置 ◎基板基板
◎異常時のリカバリー動作	
<b>第4章 全体構造</b>	
4-1 機器	
◎分類平面 ◎アベ	
4-2 メインフレーム	
◎メインフレーム本体 ◎センターフレーム ◎アッパー/ローラー	
4-3 腿部	
◎外部外装 ◎走行履歴計測	
4-4 想定される使用環境	
◎各部シーリング ◎諸説	

<https://info.nikkeibp.co.jp/nxt/campaign/b/281020/>

Spot硬件资料我主要参考了日本前段时间出版的一本拆解教程，非常详细非常贵也非常值得一读，原价3万多人民币。最后我会把这本书免费分享出来，希望大家多点赞投币加关注



先看看Spot的整体外观，可以和其他几款四足机器人对比，包括MIT 的Mini Cheetah、国内云深处的绝影 X20（英文发音），美国Ghost机器人的Vision 60，ETH 的Anymal机器人，不知道大家喜欢哪一款

## 设计

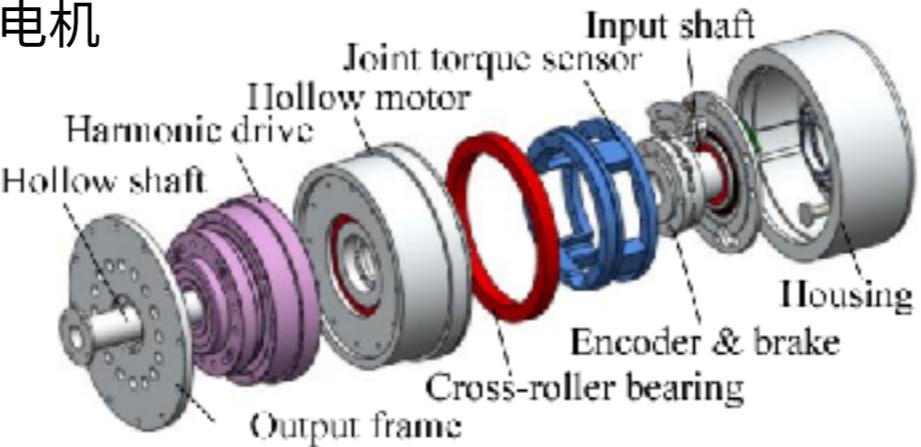
- 大长腿
- 模块化
- 简洁
- 轻量
- 散热



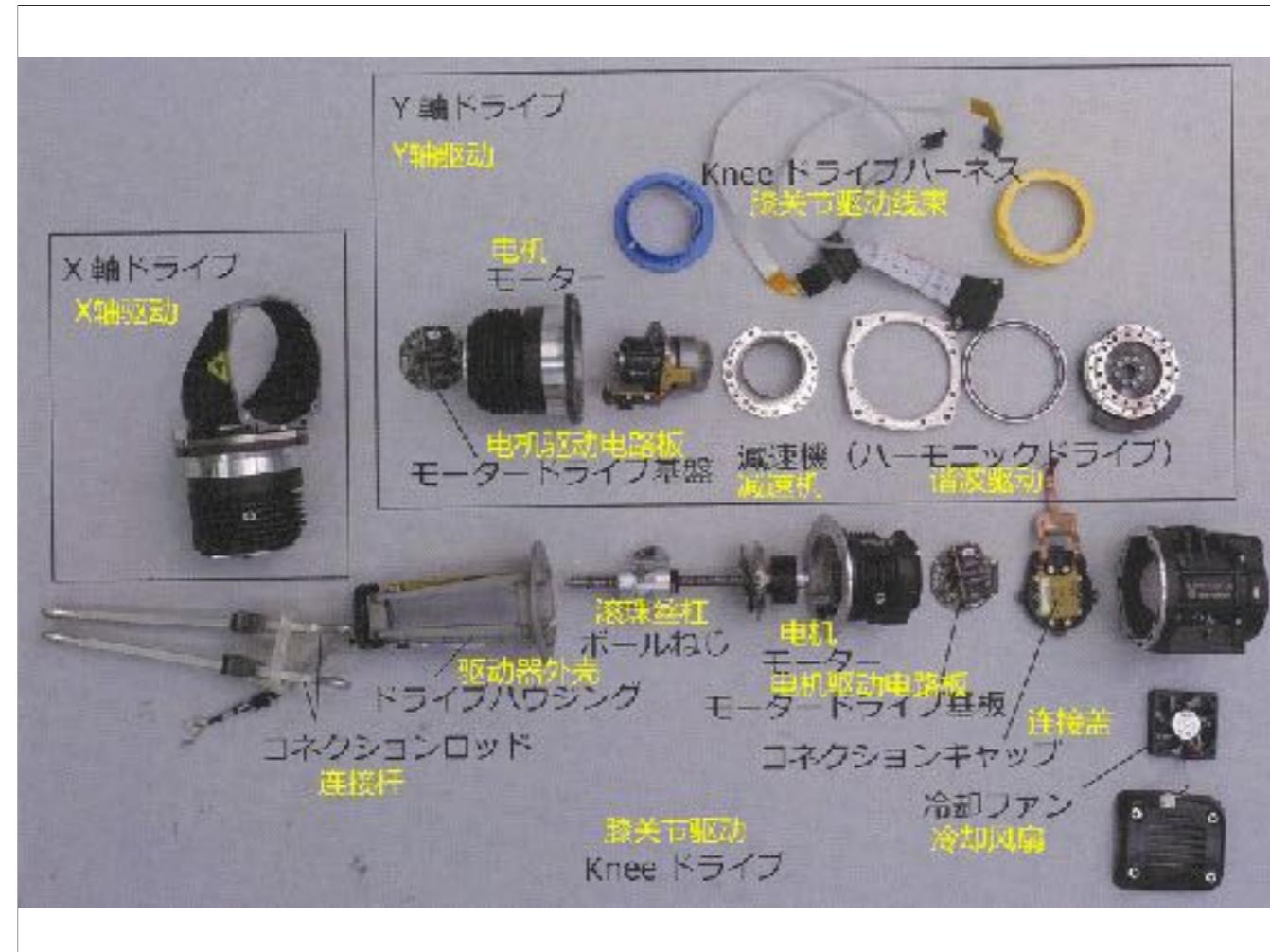
我个人喜欢Spot得大长腿设计，因为腿长的稳定性和移动性更佳，也对感知算法开发有很大帮助，熟话说站得高看得远。仔细观察Spot拆解的所有零部件，采用了模块化设计，布线也体现出简洁美观的特点。Spot大量采用了树脂等非金属材料，实现轻量化设计。还仔细考虑了散热问题

## 关节

- 谐波减速器 vs 行星减速器
- 滚珠丝杆 vs 四连杆
- 力/力矩传感器 vs 电流反馈
- BLDC/PMSM电机
- 霍尔传感器



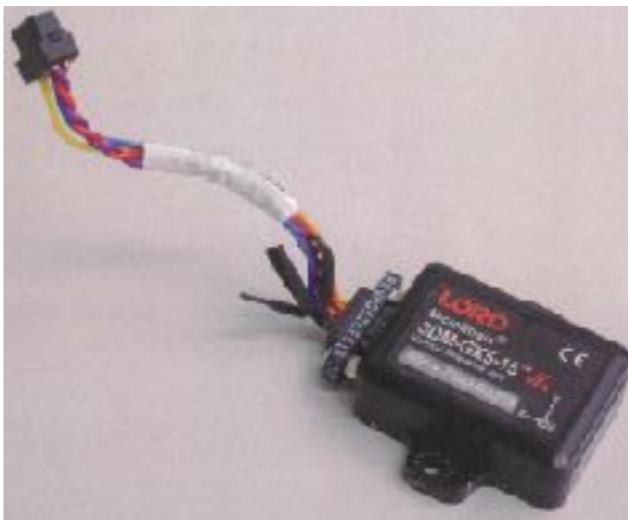
Spot和常见四足机器人一样，总共包含12个关节；每条腿由X轴关节，即侧摆关节、Y轴关节，即大腿关节和膝关节组成。关节由驱动器、电机、减速器、编码器、和力或力矩传感器组成。Spot与常见四足机器人不一样的是，它的X轴关节和Y轴关节采用了谐波减速器，而膝关节采用滚珠丝杆传动，并且额外安装有力矩传感器。常见的四足机器人以 Mini Cheetah 为例，采用行星减速器，膝关节采用四连杆方式，而力矩则根据电机驱动的电流环计算出。所以Spot的关节更像机械臂的关节，谐波减速器的优点是减速比大，所以Spot的电机很小。至于其他优缺点留给大家思考



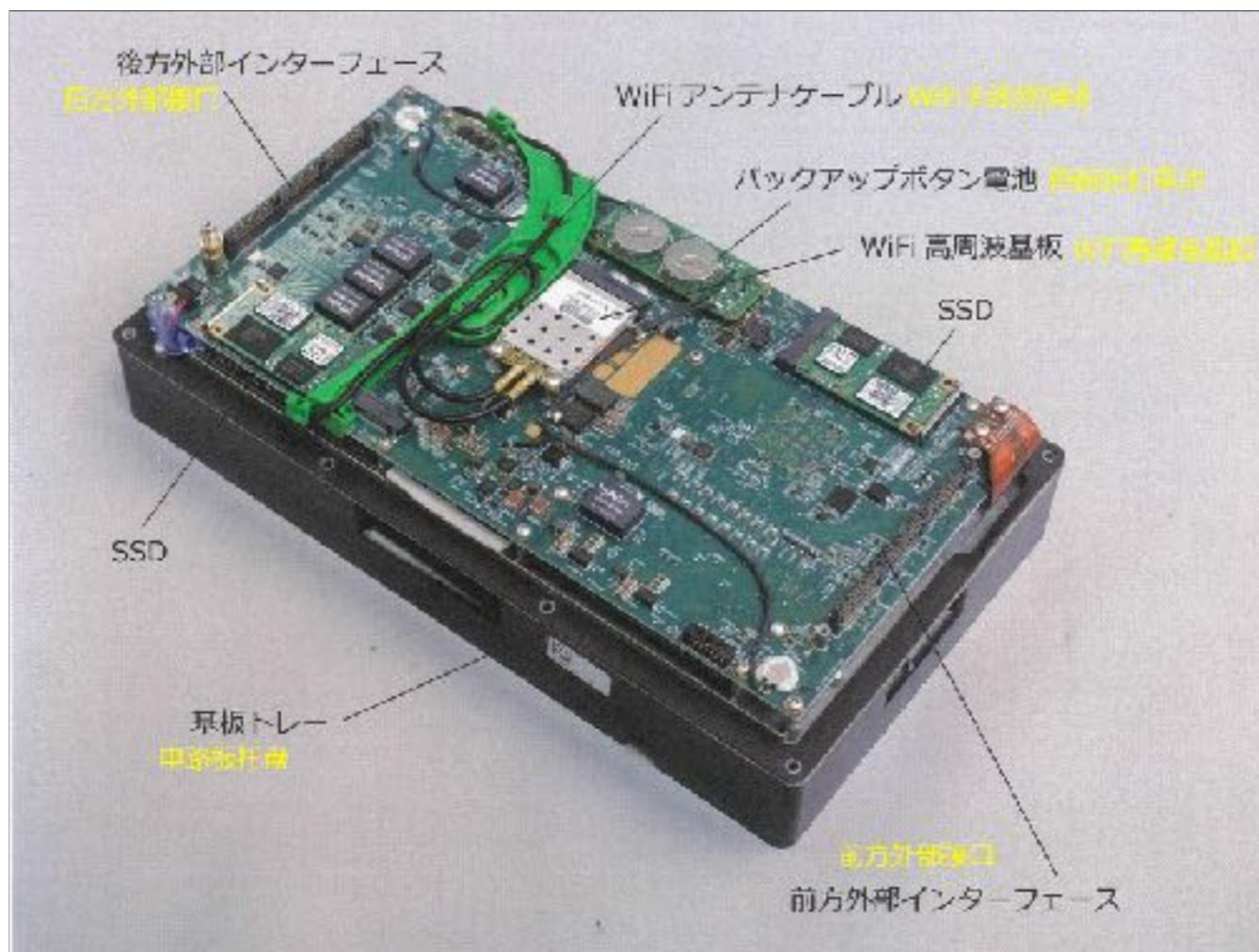
拆解发现Spot关节电机型号和驱动器都一样可以通用，只有膝关节的传动采用了滚珠丝杆而不是谐波减速。

## 电气

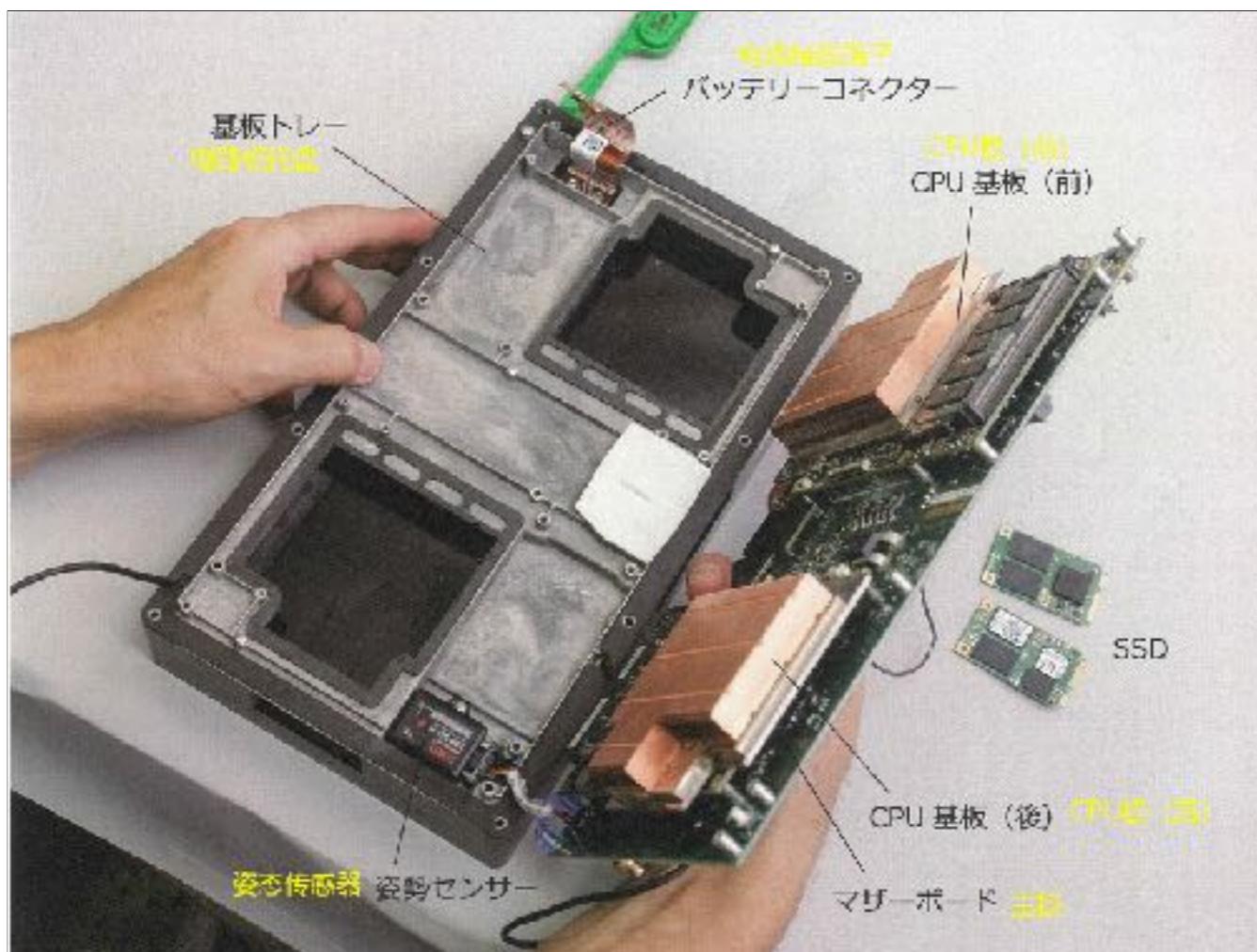
- 计算单元 Intel Xeon E3 v5\*2
- 三维感知 Intel RealSense D430\*5
- IMU 3DM-GX5-15\*1
- 电源 18650\*56
- 风扇 \*8



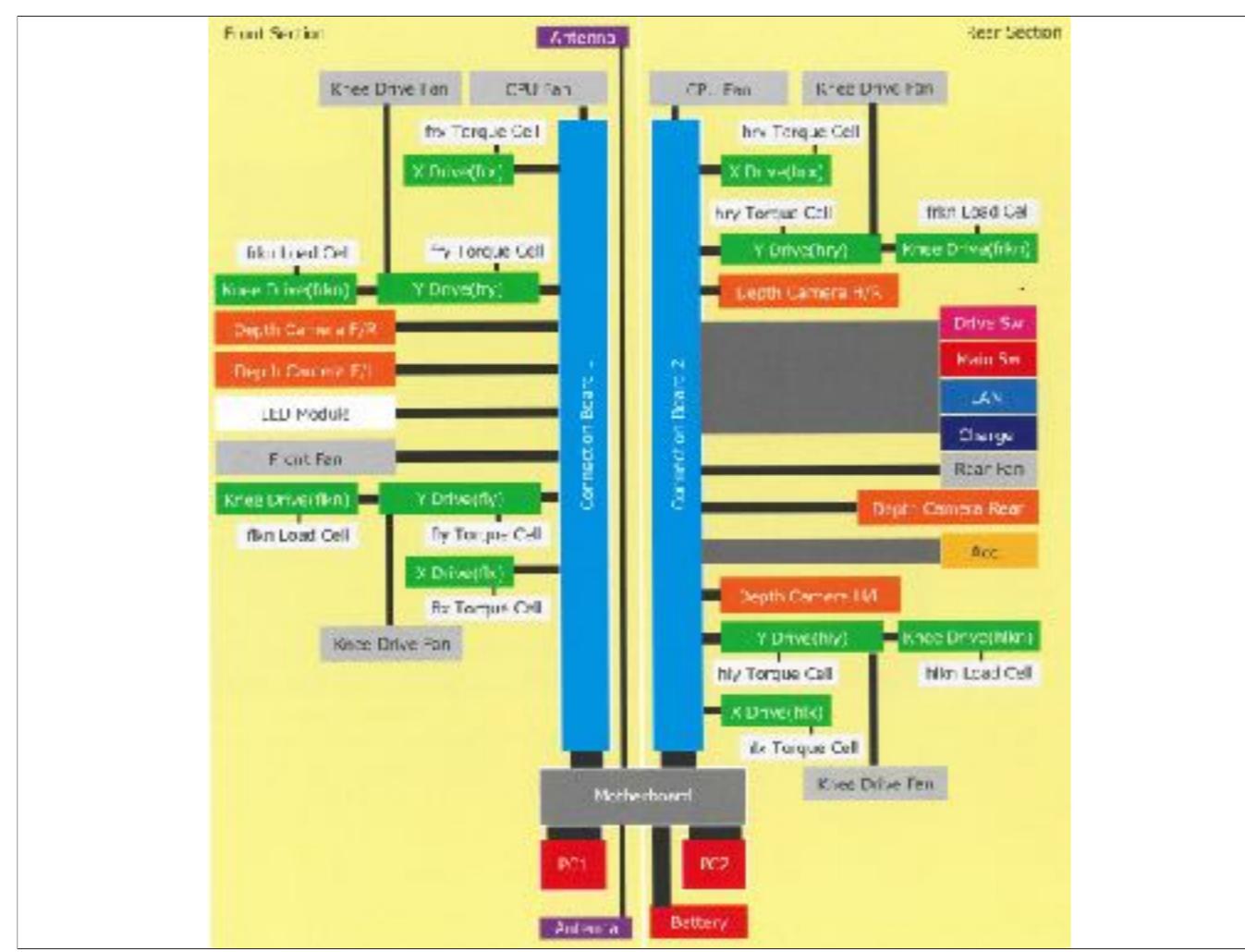
介绍完硬件的机械结构，接着讲一下电气模块。令人吃惊的是，Spot机器人身体里面装有两块Intel至强服务器芯片，为感知和控制系统提供的强大的计算资源。传感器包括5个深度相机模块，一块工业级IMU。电气部分还有一块单独设计的电池，外加8个风扇复杂关节和计算机主板散热



大家可以欣赏一下Spot的大脑，也就是计算机的主板。这是主板的正面



主板背面搭载了两块CPU板，每块拥有16G内存，可以发现设计时仔细考虑了CPU的散热问题

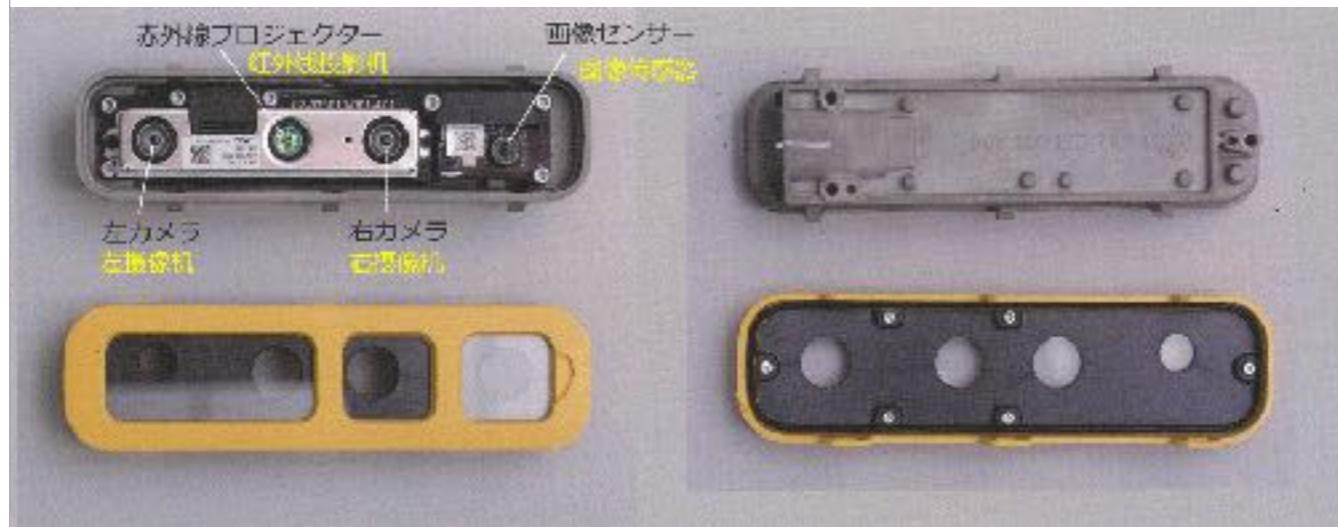


硬件介绍的最后，分享一下Spot电气结构图。从设计的角度来看，Spot好比是手机中的苹果

# 感知篇

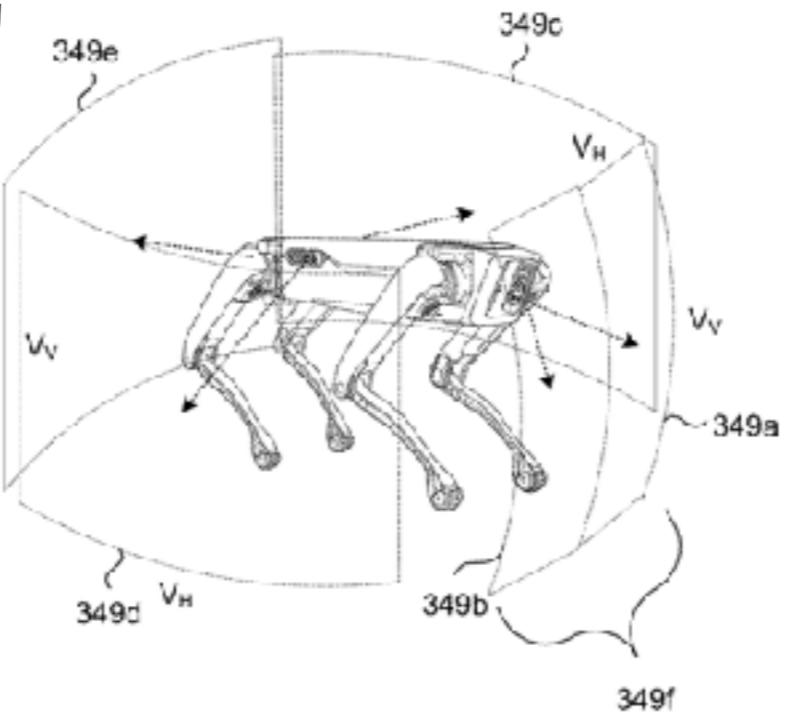
介绍完硬件部分后，结合个人经验谈谈Spot的核心算法，包括感知和规划。四足机器人的基本功能是“看得见，走得稳”。其中感知算法用来解决机器人“看得见”的问题

# 深度相机



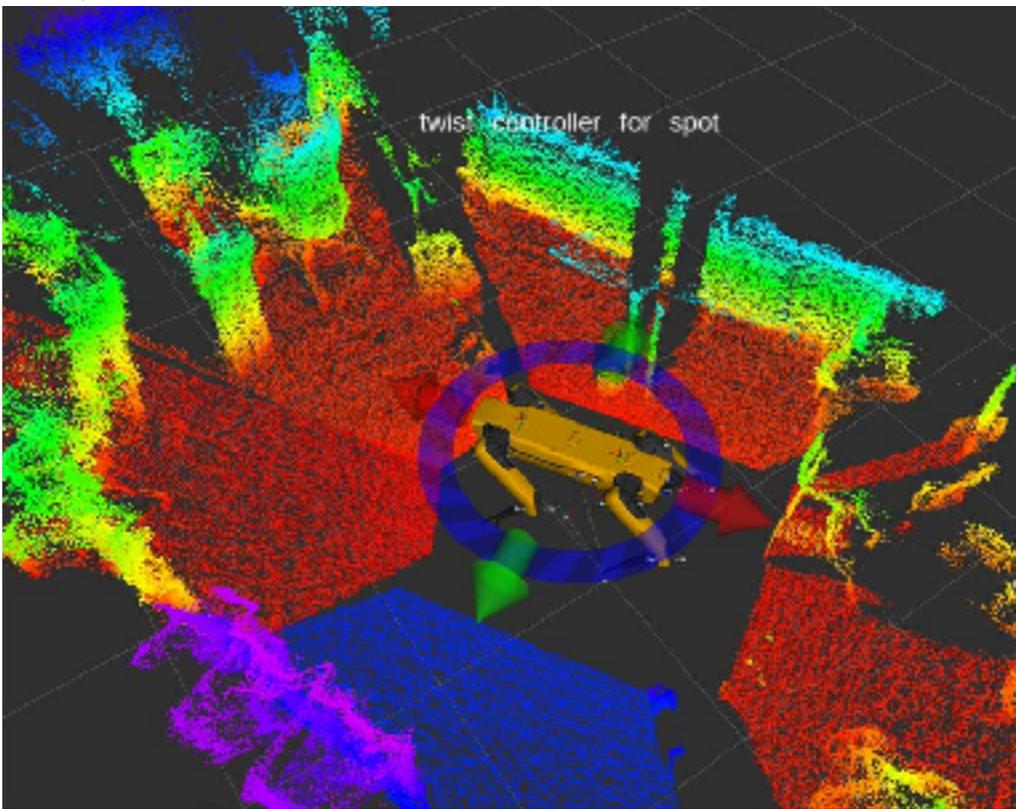
Spot感知算法的核心硬件是D430深度相机模组，由两个全局曝光的灰度相机组成，利用双目视差能实时测量出周围物体到机器人的实际距离。

## 相机布局



布局5个深度相机基本能实现360度覆盖，为感知算法提供基础。如果只有一个相机，会存在感知的盲区，导致机器人无法判断盲区是否安全，降低机器人的自主能力

## 全向感知



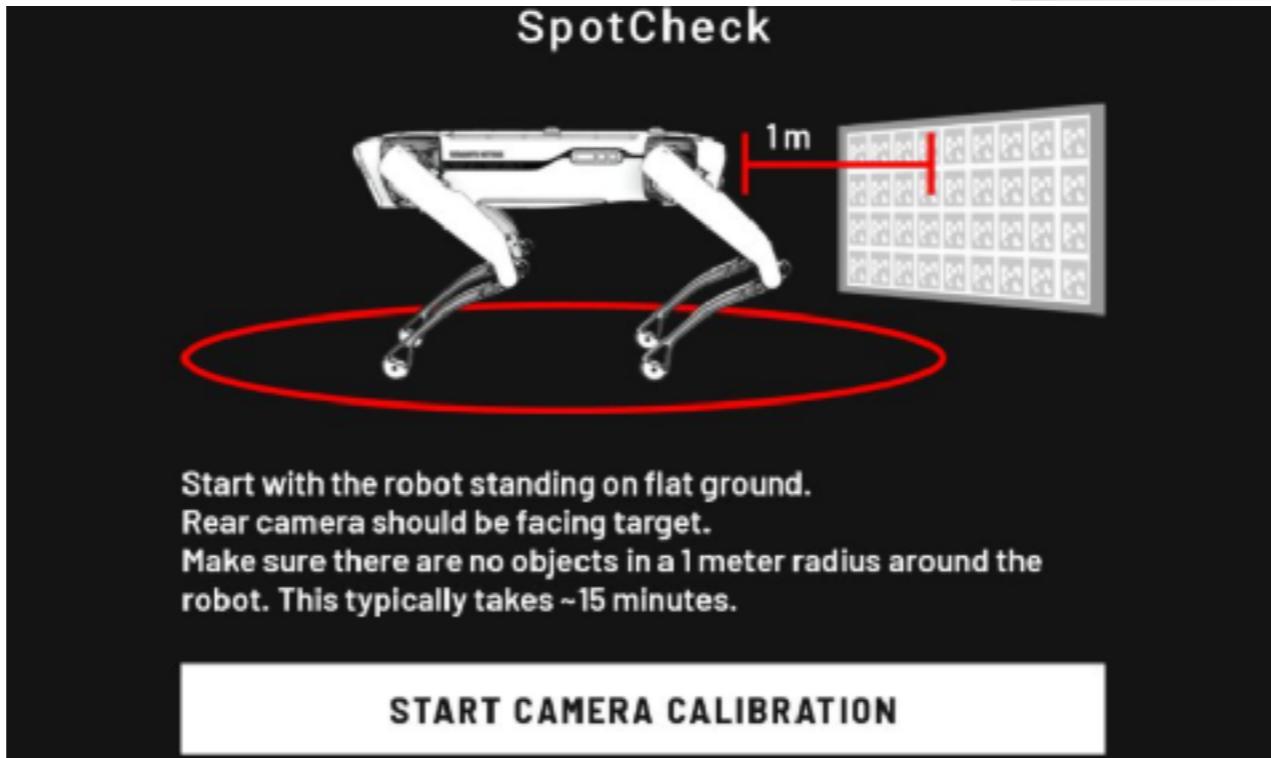
Spot深度相机感知的效果很惊艳

## 全向感知



全向感知技术在无人机领域也广泛应用，提高避障功能，包括Mavic 3和Skydio 2无人机

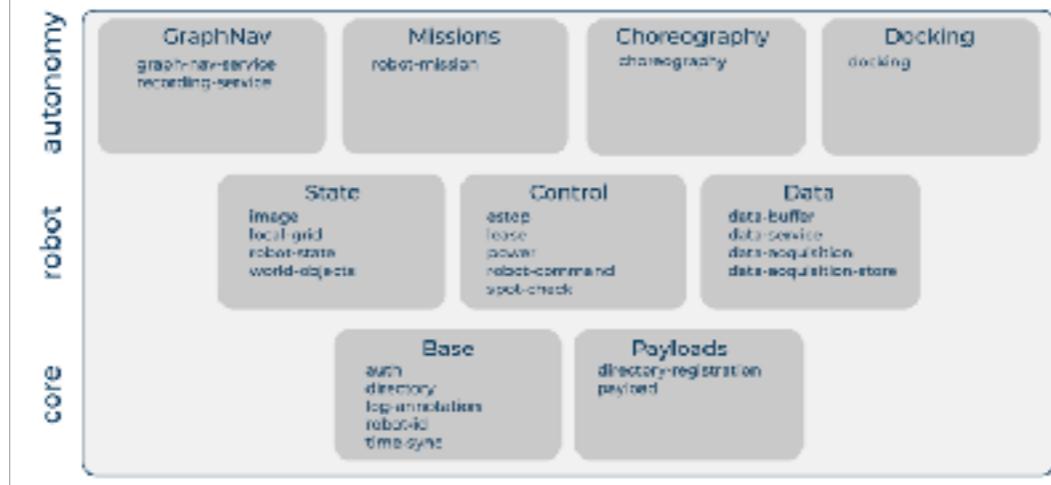
# 相机标定



不知道你是否注意之前出现的一个印有规则图案的平板。是的，它就是Spot的相机标定板，长118cm、宽50cm。为什么标定板这么大，我认为是为了标定出多个深度相机的外参数，即相机布局的相对位姿，为相机数据融合，构建高精度地图提供基础

## State of Spot

- **Image**
- **Local-grid**
- **Robot-state**
- **World-objects**



Spot的感知算法的输出结果，即状态，包括融合后的图像、局部地图local grid、机器人状态和有特殊意义的对象

## Local-grid

- 128\*128, resolution: 3cm
- Ray tracing
- ESDF
- Body/Step/Height map

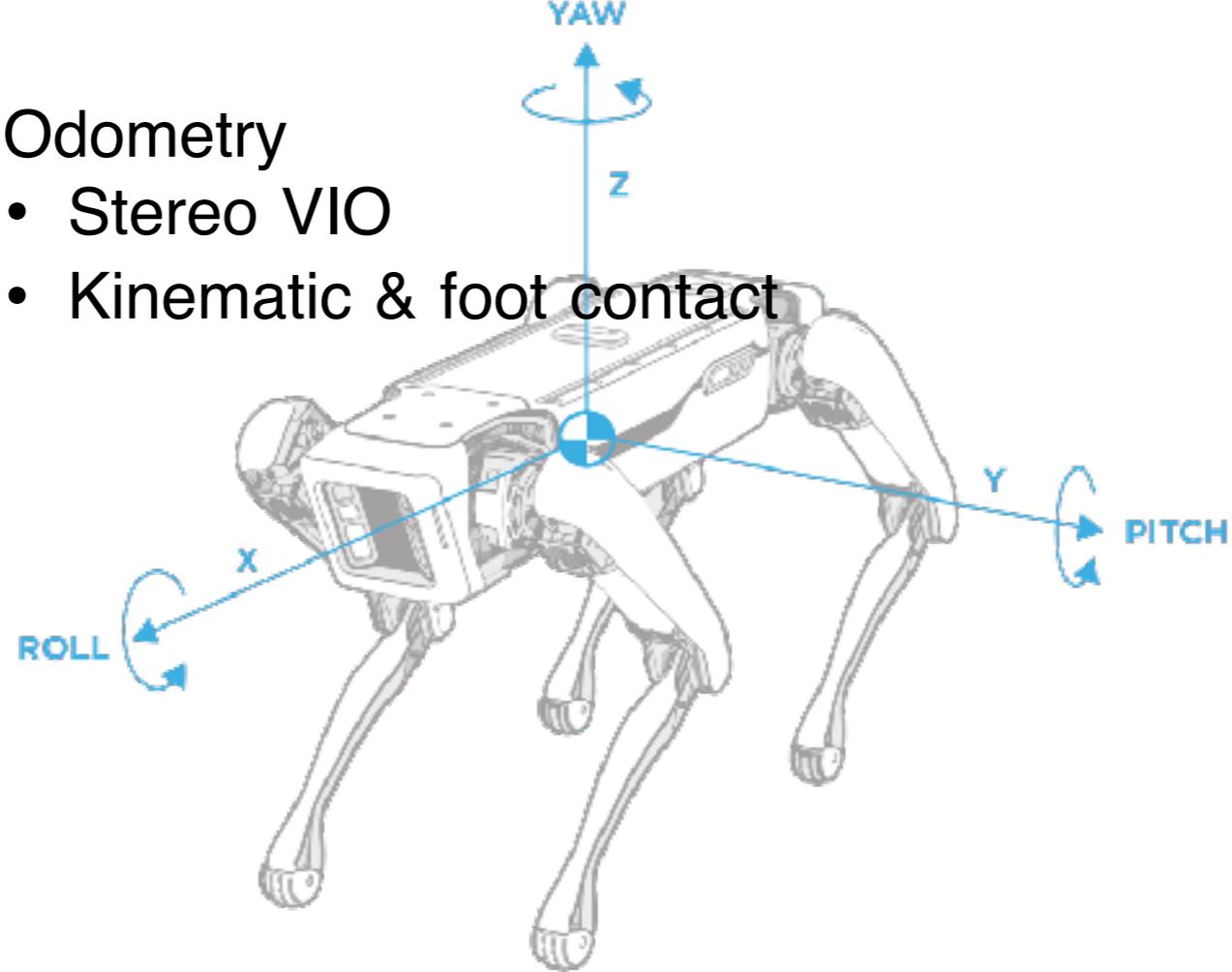


0	0	0	0	0	1	2	3	4	5
0	-1	-1	-1	0	1	2	3	4	5
0	-1	-2	-1	0	1	2	3	4	5
0	1	1	1	0	1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	1	2	3	4	5
2	1	1	1	1	1	2	3	4	5
3	2	2	2	2	2	2	3	4	5
4	3	3	3	3	3	3	3	4	5
5	4	4	4	4	4	4	4	4	5
6	5	5	5	5	5	5	5	5	5

局部地图用来表示机器人周围约4m\*4m范围内的障碍物信息。根据公开的专利书，Spot先用光线追踪Ray Tracing技术构建出3D局部地图，然后基于3D的局部地图提取出障碍物信息，输出三张2D地图，包括身体障碍物局部地图、足端障碍物局部地图和提供高度信息的局部地图。可以发现，四足机器人的感知算法比飞行器复杂很多，因为飞行器只需要避开所有空间里存在的物体，而四足机器人需要与地面接触的同时避开潜在的障碍物。可以把四足机器人理解为在2.5维空间的导航，为轮式机器人在2D中导航，无人机在3D中导航。

## Odometry

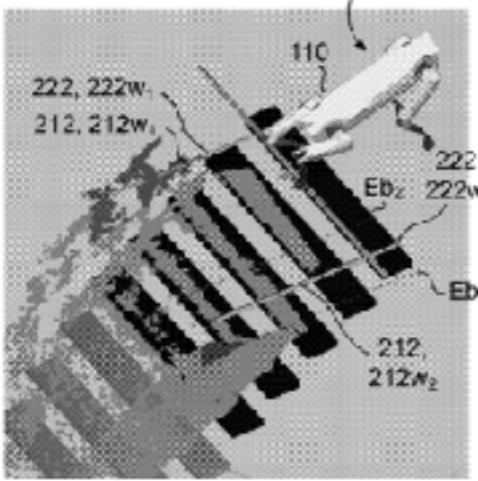
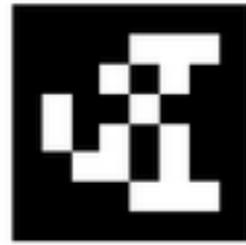
- Stereo VIO
- Kinematic & foot contact



机器人状态主要包括里程计定位信息和关节角度等，这里主要关注里程计定位。个人推测Spot的定位算法采用了多相机的视觉惯性里程计VIO融合运动学和足部触地信息实现。多相机VIO的好处是可以大大提高定位系统的可靠性。根据硬件拆解还发现，Spot没有做多深度相机间的硬件同步。

## Objects

- Stairs
- AprilTag
- Door handle



Spot状态信息所含最后一部分是具有特殊意义的对象，官方文档提到的有楼梯对象、AprilTag视觉对象、门把手对象。根据公开的专利书，Spot感知系统会检测楼梯，利用楼梯信息辅助规划控制。AprilTag视觉对象可以帮助机器人实现视觉重定位。门把手检测可以辅助机器人完成自主开门

# 规划篇

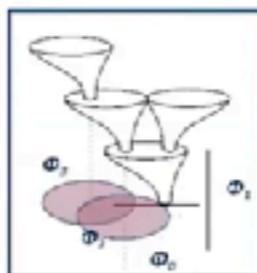
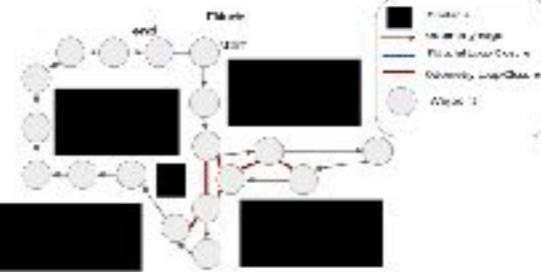
刚刚介绍的感知算法用来解决机器人“看得见”的问题；而规划算法，则解决了机器人“走得稳”的问题

# Spot Control Framework

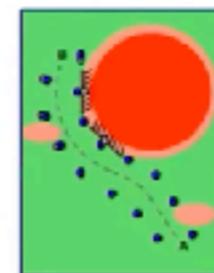
## 4 Layers

1. Navigation & Autonomy
2. Dynamics & Balance via Sequential Composition
3. Foot placement and local obstacle avoidance -- Quadratic programming.
4. Force control (stance) Position control (swing)

### Navigation & Autonomy



Sequential  
Composition



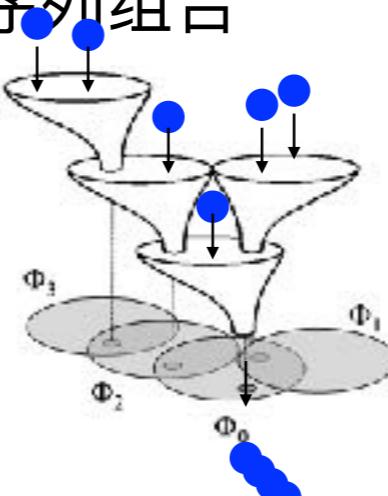
Foot Placement



根据公开的视频，Spot的规划控制方案采用了分层的套路。第一层为自主导航层，主要完成粗糙的点到点的规划，比如可以用A\*算法实现，在这一层我们把Spot当作一个质点，类似于全局规划，先用全局方法寻找拓扑结构，提供一个粗糙的初始值；第二层采用Sequential Compostion，中文名我把它翻译为序列组合方法，这一层我们把Spot当作一个线性倒立摆LIP，同时考虑机器人的稳定性约束，细化上一层的初始值。第三层把机器人当作一个单刚体，考虑足部和身体约束，采用二次规划QP输出落脚点位置和质心轨迹。最后一层考虑机器人完整的动力学模型，控制触底腿关节和摆动腿关节

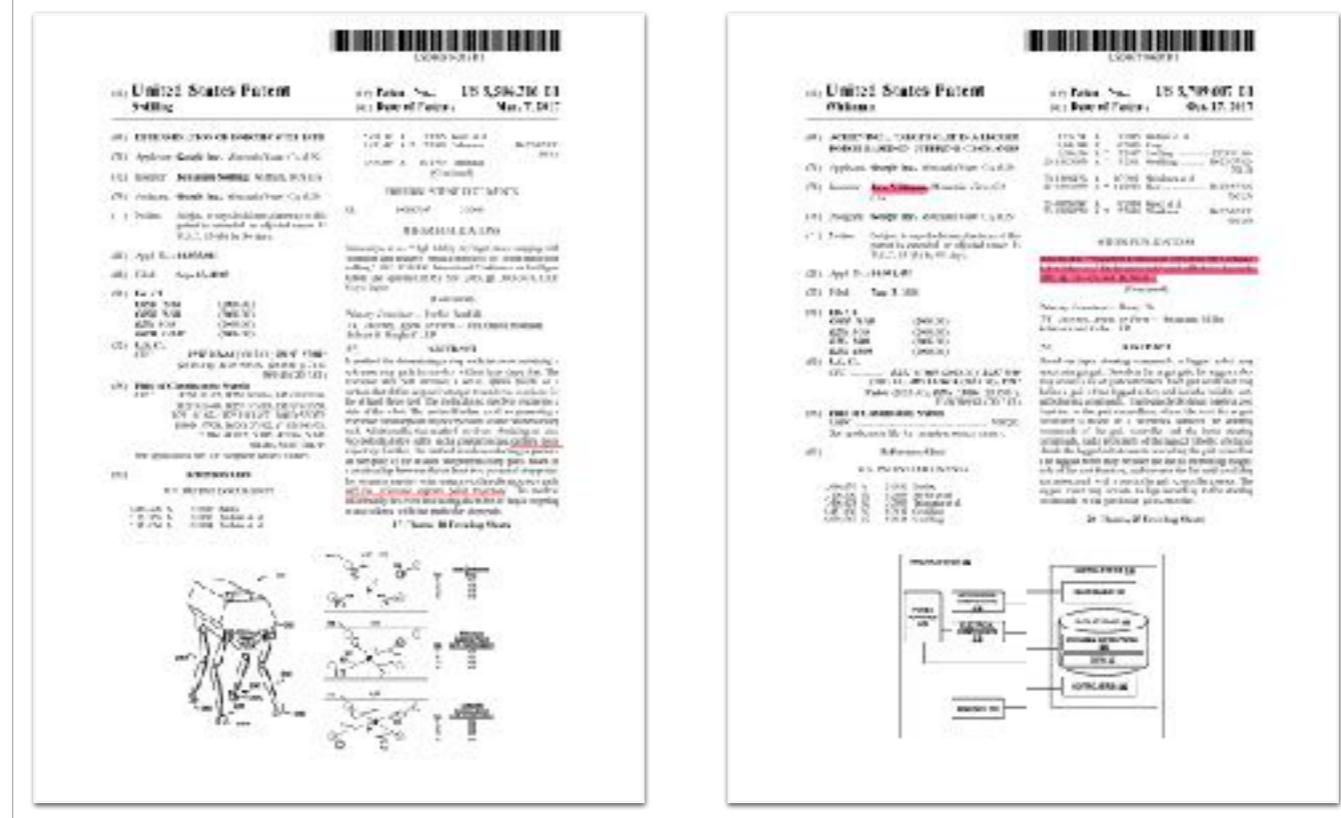
## Sequential Composition 序列组合

- Build complex behavior from many simple controllers
- State transitions based on estimates and measurements of system state
- Sequential composition simplifies encoding complex behavior (improved robustness)



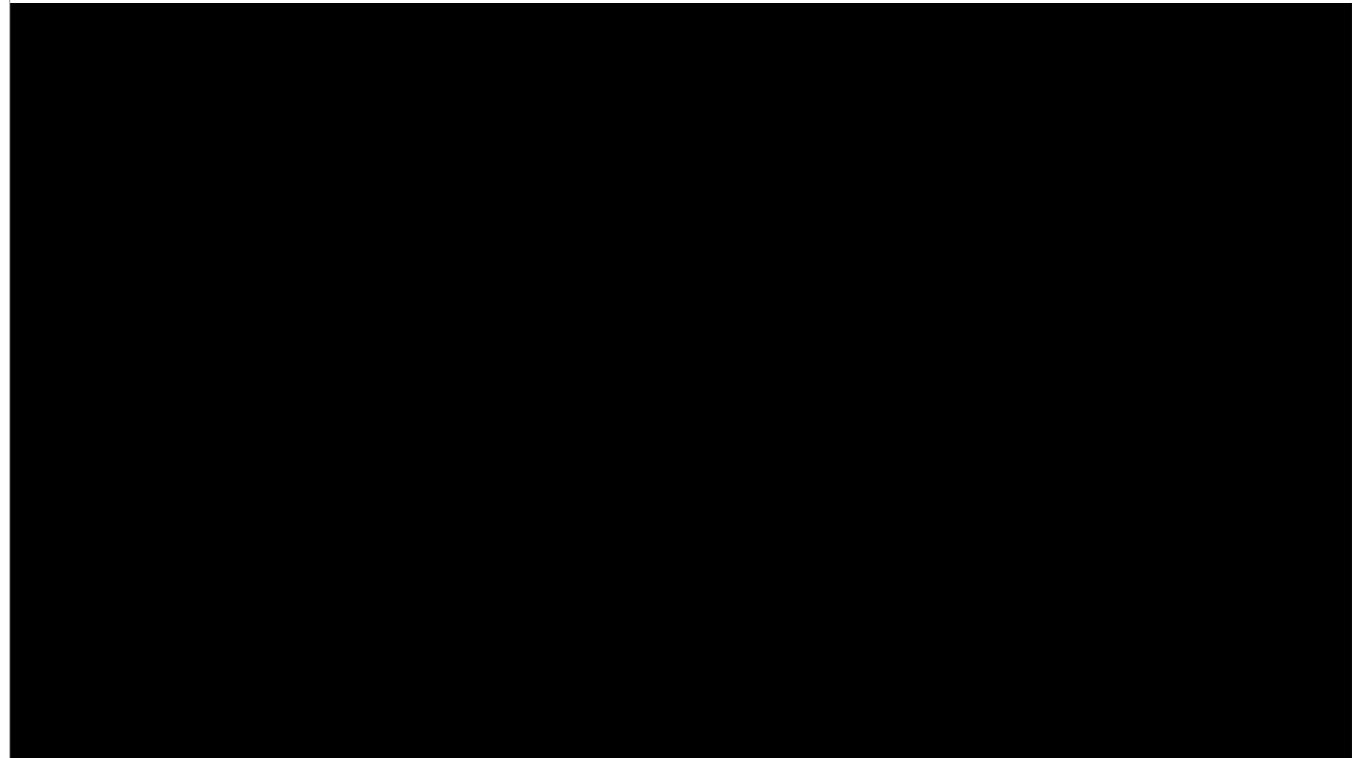
序列组合被波士顿动力官方多次提到，但是没有具体到如是实现。序列组合更像是一种指导思想，而非一种具体的算法。分享一下我的理解供参考：直观理解就是像图中由多个漏斗构成的装置，当我们只要把蓝色小球从任何一个漏斗的正上方区域自由落下后，小球总会从最底下的漏斗出来。每个漏斗相当于一个控制器，漏斗的上方输入区域表示控制器能够稳定工作的有效区域，漏斗下方输出表示控制器的作用效果，通过把一个个控制器漏斗合理有序的串联起来，就实现了序列组合。难点在于四足机器人规划的漏斗是什么，即控制器是什么，另外一个难点是如何把一系列的控制器有效的组合起来。严谨来说，漏斗应该叫 李亚普诺夫函数

# Sequential Composition 序列组合

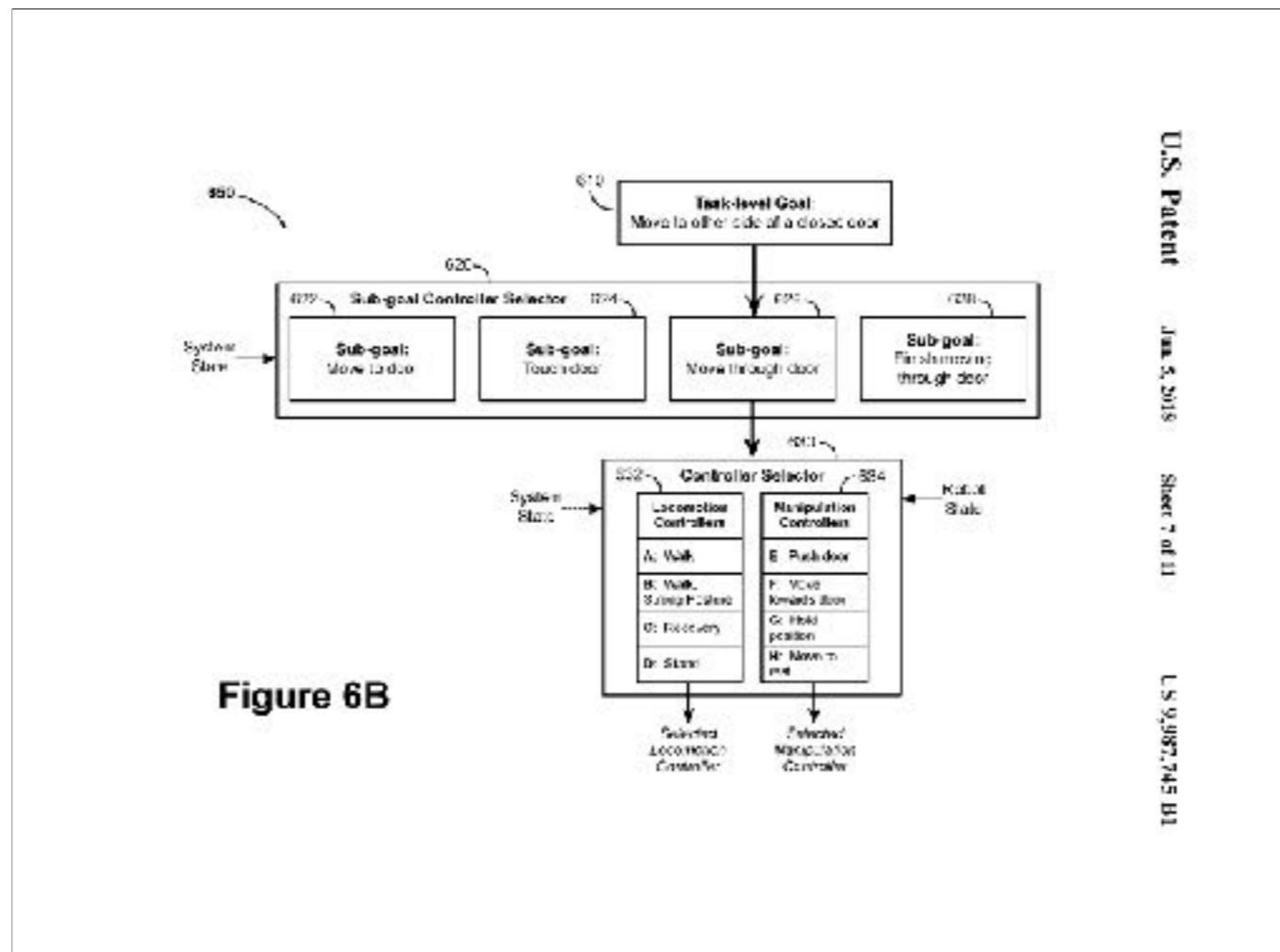


幸好波士顿动力公开了一些列的专利，其中有两篇仔细说明了Spot时如何实现序列组合。核心要点是线性倒立摆模型及其捕获点Capture Point，线性倒立摆模型作为控制对象，捕获点作为稳定性判定依据。Spot控制系统根据参考落脚点轨迹，结合当前状态生成若干条潜在的落脚点轨迹，然后评估每条轨迹的捕获点和落脚点，执行最优轨迹，让机器人的运动“又稳又准”

## 控制效果



视频中展示了Spot两个惊人的鲁棒控制案例，分别是自主开门和自主上楼梯，测试他们的人也是核心算法开发工程师

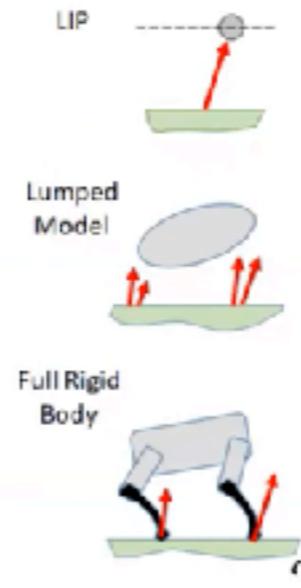


**Figure 6B**

我想提一句的是Spot自主开门时，根据公开专利可以知道，Spot应用了行为树方法，保证了整个过程的稳定性，具备很强的抗干扰能力。在我看来，行为树是另外一种 Sequential Compostion 的实现方式

# 构建动力学模型

- Spot uses model-based control for walking and movement at a variety of levels.
  - Linear Inverted Pendulum, 6 DoF single potato, and full rigid body dynamics.
  - Foothold and gait selection uses LIP.
    - Fast to compute and easy analytic solutions exist. Capture point extension provides useful stability metrics.
    - For steady-state walking/trotting, without much body orientation change, model is reasonably accurate and robust to model error.
      - CoM height
      - Robot payload
- Much of recent development targeted towards constrained environments.
  - Stairs
  - Slippery terrain
  - Foothold & Body Constraints

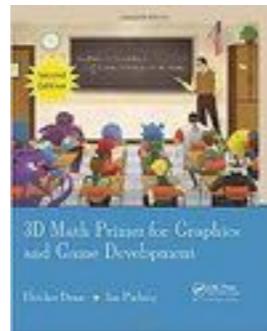
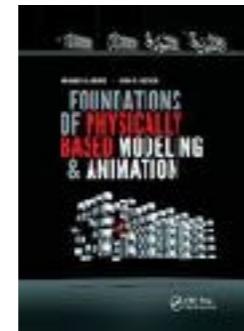


然后简要介绍一下规划控制算法的具体实现方法。我比较评价认同浙大高飞老师的看法：即 规划是开环的控制；控制是闭环的规划。首先我们需要有一个机器人动力学模型，四足机器人常用的模型有线性倒立摆、单刚体模型、全刚体模型，从简单到复杂，适用于不同的规划控制层面。插一句题外话，为什么以大疆为例的多旋翼飞行器成功落地了，我认为其中一个重要因素是飞行器的动力学模型相比于四足机器人简单太多，飞行器动力学模型有微分平坦特性，大大简化了规划控制算法，为多旋翼飞行器技术商业落地提供了理论基础

# 仿真 = 动力学 + 约束

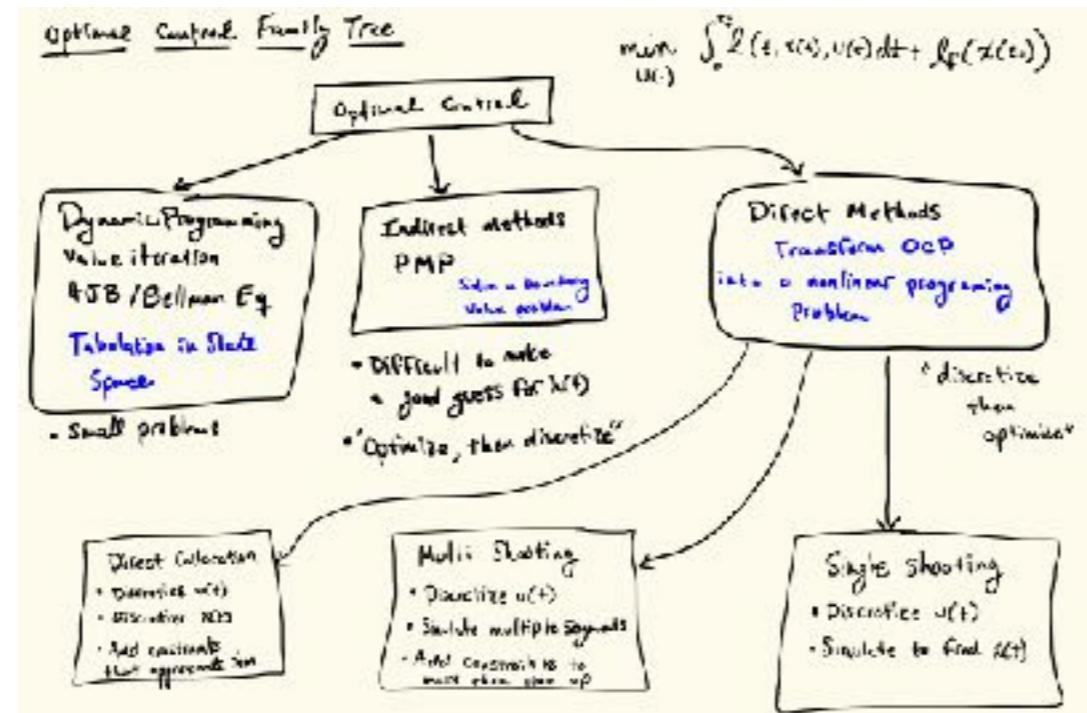
Lagrangian dynamic equations

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i .$$



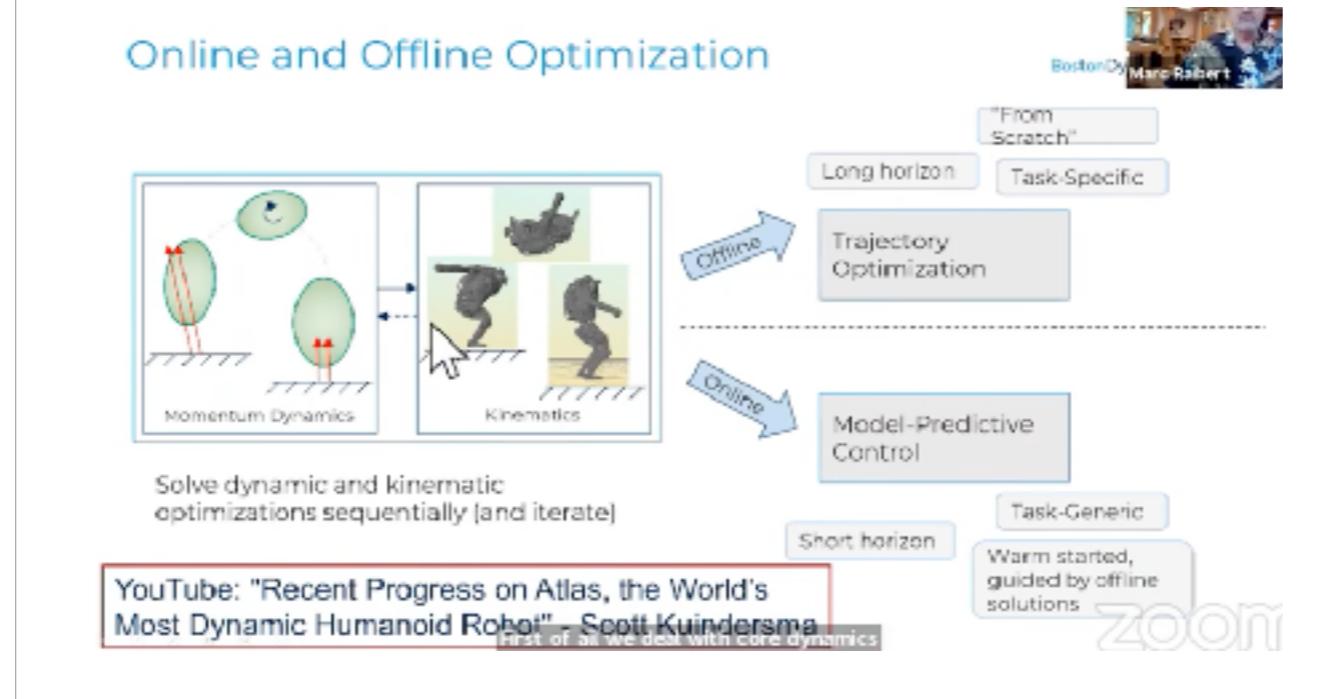
动力学模型的一个直接应用就是仿真，刚体仿真的难点是如何处理碰撞约束，也是轨迹优化的热点。仿真平台推荐 Drake 和 ODE，Drake 非常强大，提供了建模、仿真、数值优化等工具，仿真精度高，缺点是更新太快导致部分接口经常变动。左下角推荐了两本容易读懂关于仿真原理的参考书

# 问题表述之最优控制 or 轨迹优化 or MPC



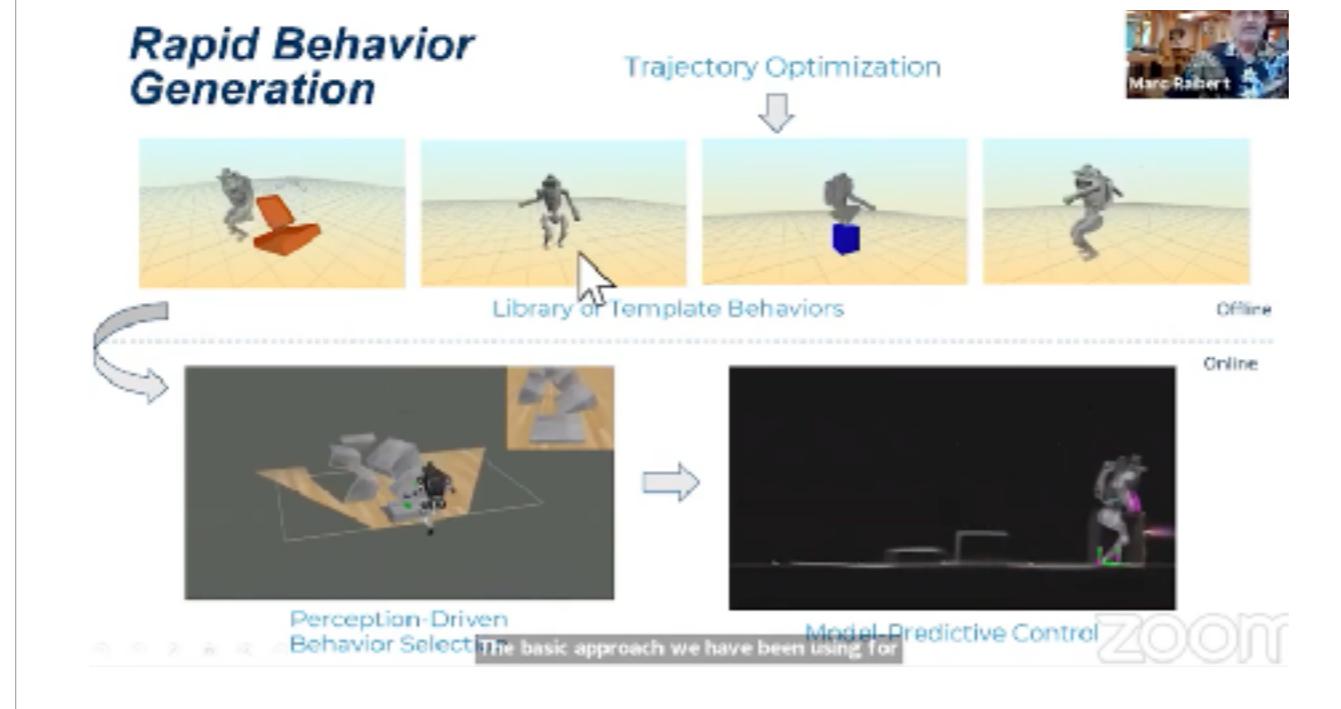
有了动力学模型和仿真的基础后，我们就比较愉快的做轨迹优化了。在我看来，轨迹优化和最优控制是等价的。具体实现算法又细分为直接法和间接法，区别是，间接法是“先优化再离散”，而直接法是“先离散在优化”，直接把原始问题转为非线性优化问题，好处是可以利用很多现成的求解器。目前直接法比较常用，比如直接配点法

## 问题表述之最优控制 or 轨迹优化 or MPC



轨迹优化和MPC具体如何在机器人控制中应用可以参考波士顿动力的公开视频。轨迹优化一般是离线的，执行周期相对较长，可以采用高复杂的动力学模型；MPC一般是在线的，执行周期相对较短，常用简单的动力学模型结合运动学模型

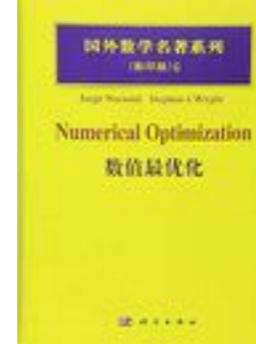
## 问题表述之最优控制 or 轨迹优化 or MPC



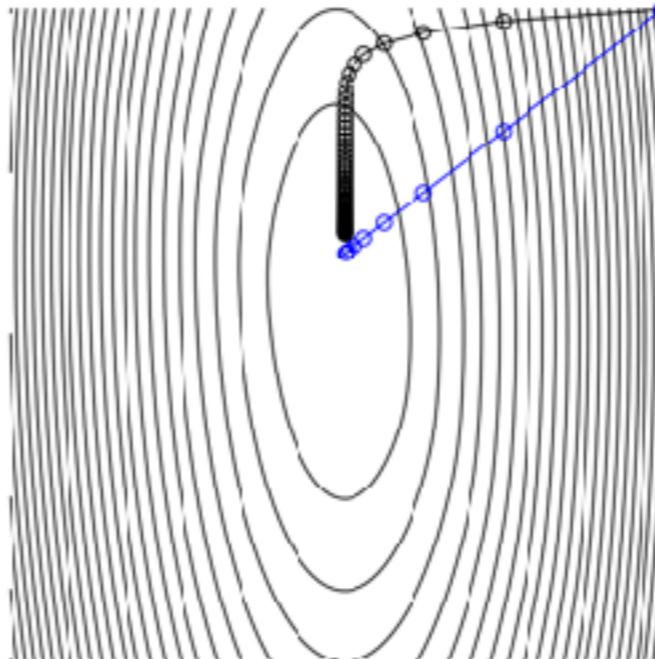
比如Atlas机器人跑酷时，采用轨迹优化离线生成行为库，包括跳跃、翻滚等动作，相当于一段开环的轨迹。真正跑酷时，机器人根据当前的感知信息，从行为库里选择合适的轨迹，作为MPC控制器的输入。MPC相当于闭环的执行了轨迹优化的结果

# 数值优化

- Principle of Stationary Action
- 约束问题
  - 罚函数方法
    - 内点法 (IPOPT)
    - 增广拉格朗日
  - QP
  - SQP (SNOPT)



CMU Lecture: Convex Optimization: Fall 2019

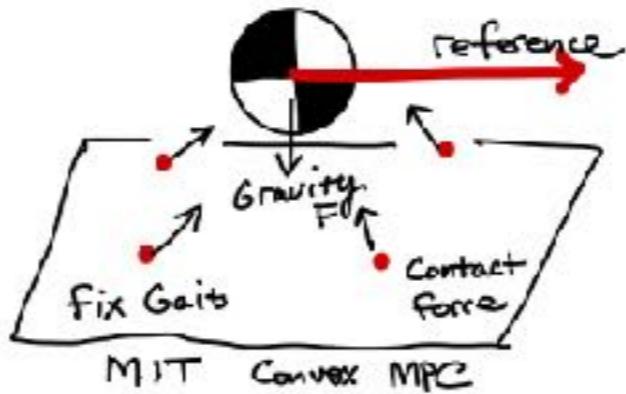


<https://www.stat.cmu.edu/~ryantibs/convexopt>  
<http://underactuated.mit.edu/optimization.html>

An Introduction to Lagrange Multipliers: <http://www.slimy.com/~steuard/teaching/tutorials/Lagrange.html>

轨迹优化和MPC问题最终都需要用数值优化方法求解，优化问题一般分为无约束最优化问题和约束最优化问题，前者相对简单一些，包括一阶的负梯度法和二阶的牛顿法及其变种；而实际中大部分都属于约束问题，常用求解方法包括内点法、增广拉格朗日函数法、SQP等，常用的求解软件包括Drake、CasADi、IPOPT、SNOPT等，推荐两本参考书和一门课程

## 案例 MIT Convex MPC



规划小节的最后，简要介绍MIT的开源控制算法。采用的模型是单刚体模型，并对模型进行了简化，姿态部分只考虑了偏航角。输入信息包括固定的步态和质心速度指令，控制系统根据速度指令积分得到未来一段时间内的质心参考轨迹，包括位置和速度。MPC的目的是让机器人质心尽可能的跟踪质心参考轨迹，计算出未来一段时间内的足底所需要的力，然后根据雅可比矩阵计算出关节需要输出的力矩，最终让关节驱动单元负责执行。该算法比较简洁，实际控制效果也不错，但是对落脚点考虑不足，有很多可以改进的地方。相比于Spot，缺少动作的流畅性和自然性

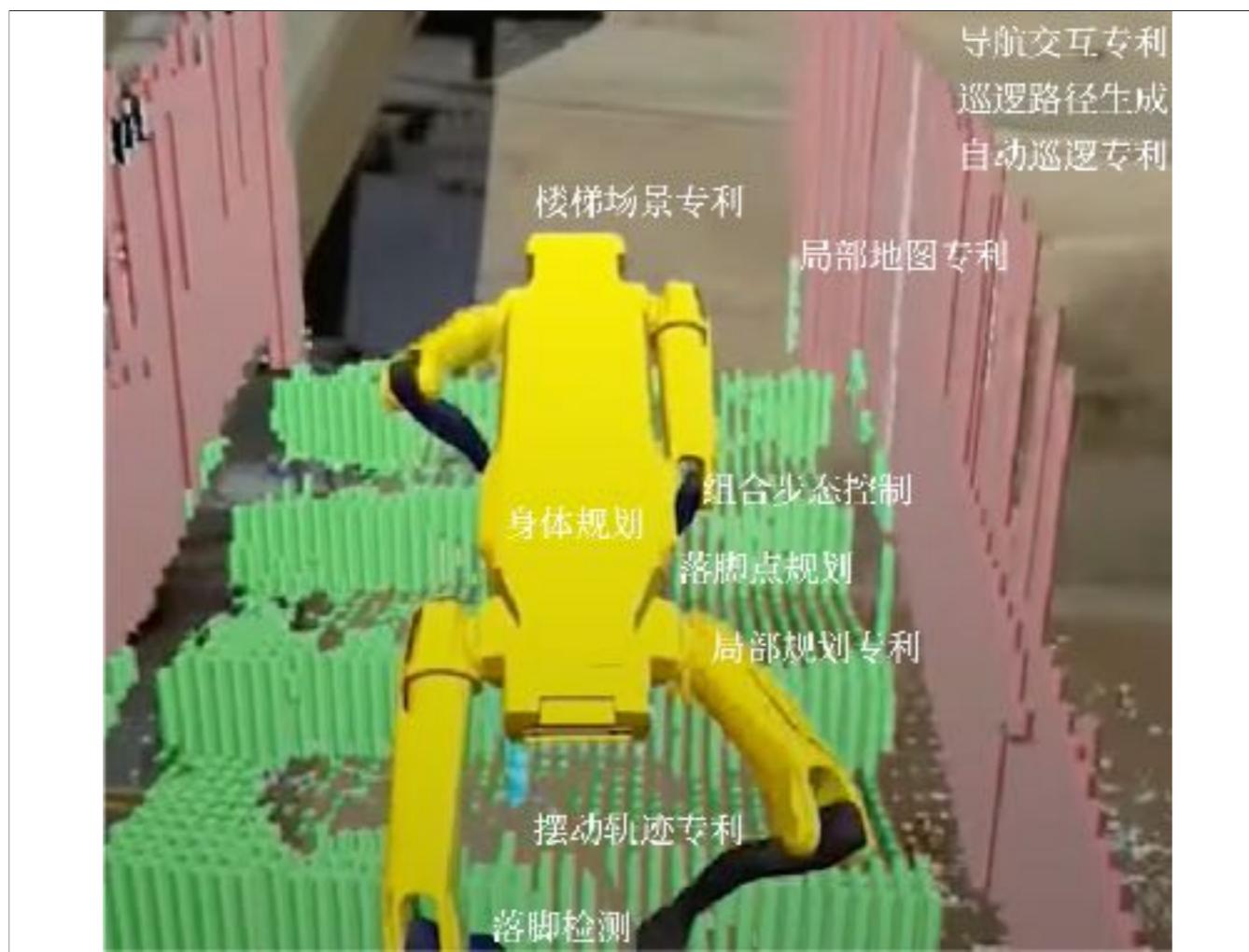
# 总结

最后总结一下，我们在第一节的导论部分介绍Spot机器人的发展历史，第二节介绍了硬件设计、机电部分，第三节开始介绍软件部分，包括感知算法，建图、定位。第四节重点介绍了规划和控制算法。

# 学习资料

- MIT 6.832
- GitHub
  - Drake: Model-Based Design and Verification for Robotics
  - IHMC Open Robotics Software
  - Cheetah-Software
  - Spot SDK
- Books
  - Legged Robots that Balance
  - Underactuated Robotics
  - Practical Methods for Optimal Control and Estimation Using Nonlinear Programming
  - Numerical Optimization
  - Mathematical Methods of Classical Mechanics
  - 3D Math Primer for Graphics and Game Development
  - 数值最优化方法
- 杨硕: 机器人的带约束轨迹规划

我梳理了一些足式机器人学习的资料，分析给大家



Spot虽然没有发表相关论文，但公开了很多专利，好处是可以从中窥见一些实现原理，坏处是限制了其他机器人公司商业落地同类产品

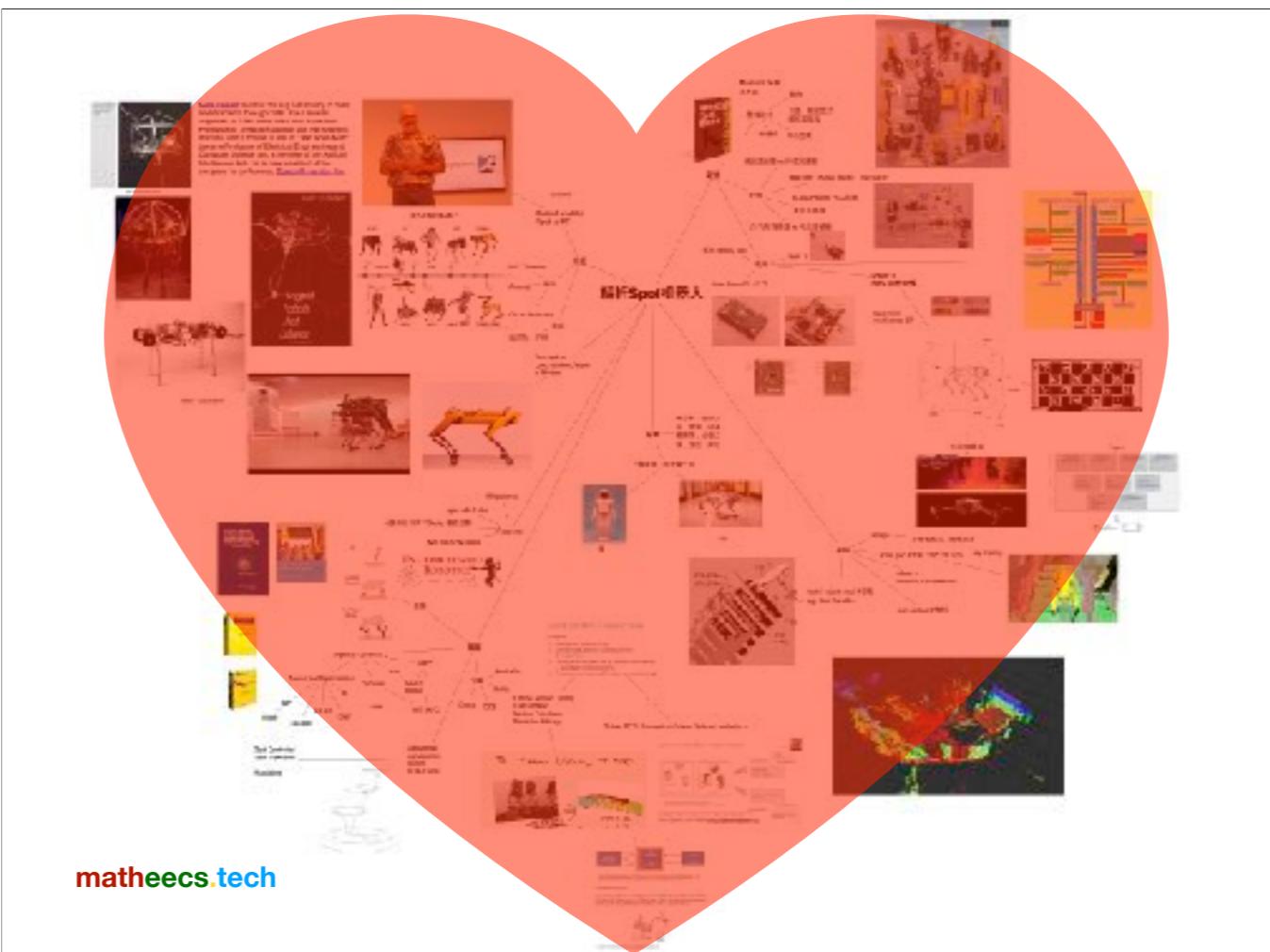
## **愿景：看得见，走得稳**

### **跨学科**

- 微分几何
- 数值优化
- 游戏引擎
- 仿生学
- 图形学
- 分析力学
- .....

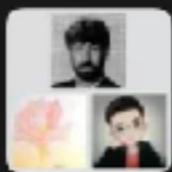
**本次分享资料下载地址 TODO**

最后，我对四足机器人的期望是，能够“看得见，走得稳”。机器人学是一个学科交叉严重的领域。希望感兴趣的你一起加入，为机器人发展贡献自己的力量



马上结束啦，希望点赞分享投币转发哦

微信交流群



解析 Spot 机器人



该二维码 7 天内 (1月 2 日前) 有效，重新进入将更新