

MoCo-12 四足机器人 缩比模型系列教程3

《模型组装与涂装》

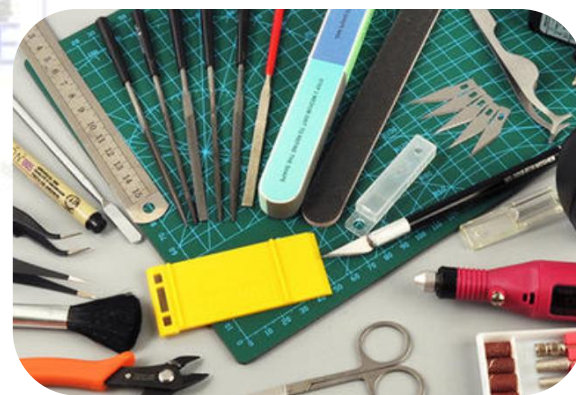
华北舵狗王

课程资料链接: <https://github.com/golaced/Quadruped-Robot-Moco-12->

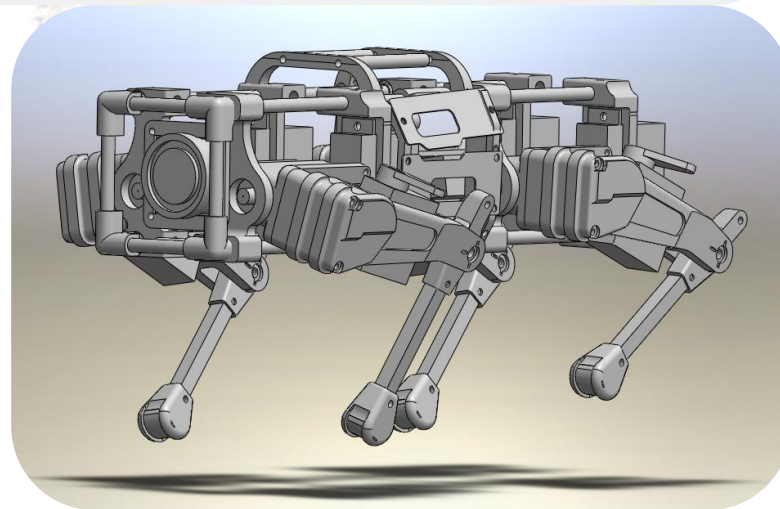
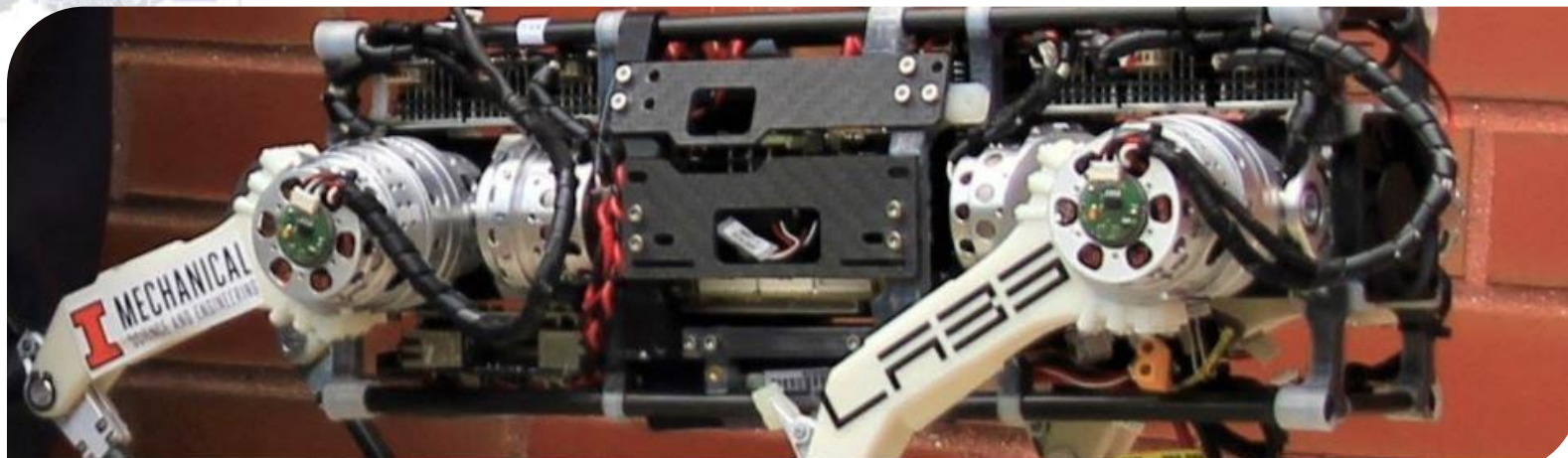
知乎链接: <https://www.zhihu.com/people/golaced>

教程规划

- 缩比模型介绍
- 缩比模型结构设计
- **缩比模型加工与组装**
- 缩比模型控制器电气设计
- 机器人步态与控制算法设计
- 静态演示与缩比场景设计



缩比模型对象

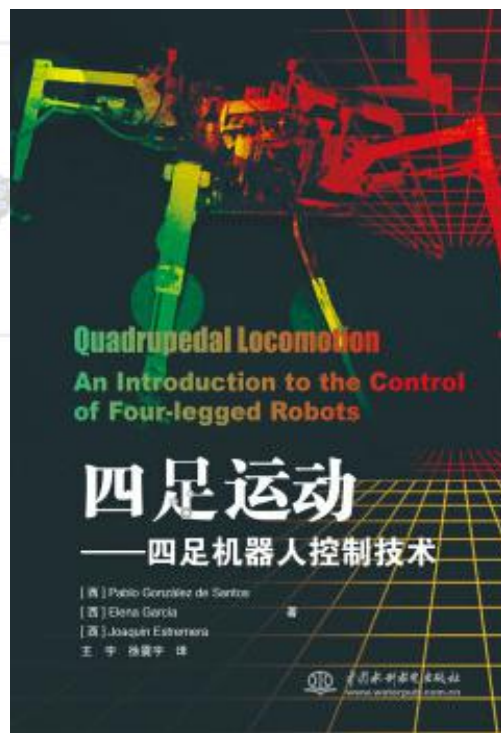


<https://www.youtube.com/watch?v=rzFrpeMpv8M>

<https://ieeexplore.ieee.org/author/37086268690>

华北舵狗王

书籍推荐



知乎推荐



王兴

机器人工程师, 科技爱好者,
9 回答 · 6 文章 · 7,598 关注者



廖洽源 相互关注

Robotics
2 回答 · 5 文章 · 6,242 关注者



xyYu 相互关注

我有一家动物园我开了六七年
2 回答 · 2 文章 · 216 关注者



小明工坊 相互关注

哈尔滨工业大学 机械电子硕士在读
26 回答 · 26 文章 · 9,987 关注者



华北舵狗王

机器人极客, 仿生机器人开发者
9 回答 · 20 文章 · 1,141 关注者

模型设计

切片

打印

打磨抛光

模型打印&切片

光固化打印机



PLA打印机



晶格热床 玻璃板

ANYCUBIC



切片软件

Cura

Powered by Ultimaker



紫外固化

模型下载

SEARCH RESULTS

7 results matching spotmini

Relevant

spotmini

SEARCH

FILTER BY

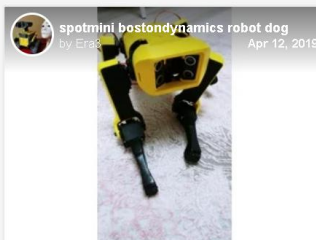
- ☒ Things
- ☐ Makes
- ☐ Users
- ☐ Collections
- ☐ Groups
- ☐ Apps



199

241

23



101

94

5

<https://www.thingiverse.com/thing:3445283>

开源项目

134 Results for "quadruped"

TYPE

- Projects 50
- Project Logs 47
- Project Details 16
- Hackers 0
- Hacker Pages 2
- Project Instructions 1



Quin the Quadruped

Project by Bryce

A quadruped with custom 3D printed legs and locomotion softw

33

20

<https://hackaday.io/project/168506-dante>

PLA: 210-225 度
ABS: 230-245 度

支撑

支撑类型

延伸到平台的

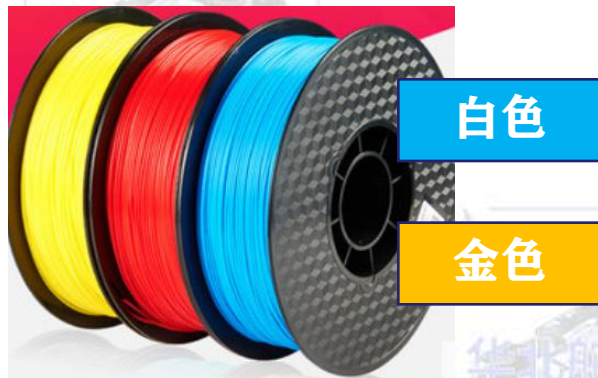
粘附平台

沿边

舵狗之家

*DogHome

567423074 LV5



白色

金色

支撑



延边



CURA 15.4参考设置

Cura - 15.02.1

文件 工具 机型 专业

基本 高级 插件

打印质量

层厚(mm)

0.2

壁厚(mm)

1.2

开启回退

☒

填充

底层/顶层厚度(mm)

0.6

填充密度(%)

40

速度和温度

打印速度(mm/s)

50

支撑

支撑类型

None

基本

高级

插件

机型

喷嘴孔径

0.4

打印质量

初始层厚 (mm)

0.2

初始层线宽 (%)

100

底层切除(mm)

0.0

两次挤出重叠(mm)

0.15

速度

移动速度 (mm/s)

60

底层速度 (mm/s)

20

填充速度 (mm/s)

60

Top/bottom speed (mm/s)

60

外壳速度 (mm/s)

60

成型体积

200*200*200mm

层厚设置

0.05-0.3mm

定位精度

XY轴: 0.011mm,Z轴: 0.0025mm

• PLA制成的3D模型更适合用来展示不适合使用，ABS普遍强度更高

• 但PLA比ABS更容易塑形，模型光泽性好，色彩艳丽，可降解安全环保

打印件后处理

3D打印件

光滑液

烙铁烫平

打磨抛光

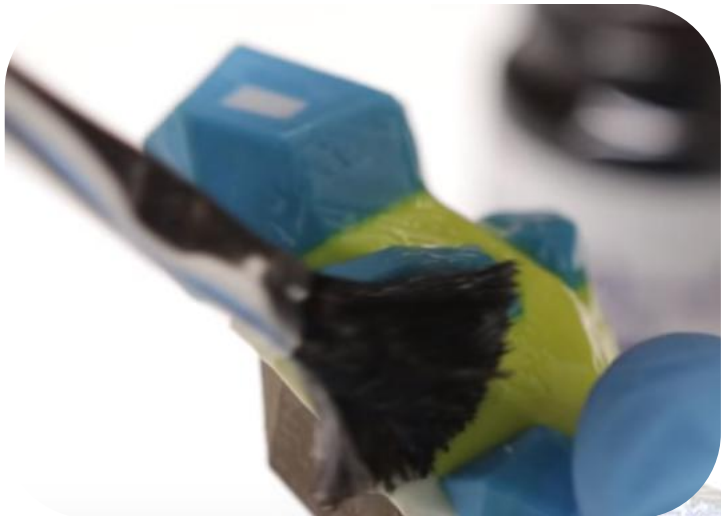


<https://www.youtube.com/watch?v=vQc5TBPF8uw>

专业模型处理流程



https://www.youtube.com/watch?v=u_hGU09Q22k&t=260s



有毒气体



手套防护



涂刷不均匀



喷漆



水抛



补漆



<https://www.youtube.com/watch?v=0vgynnYzo08>



노을박 **Sunset Park**
2.96万位订阅者



사나고 **Sanago**
212万位订阅者

3D打印笔



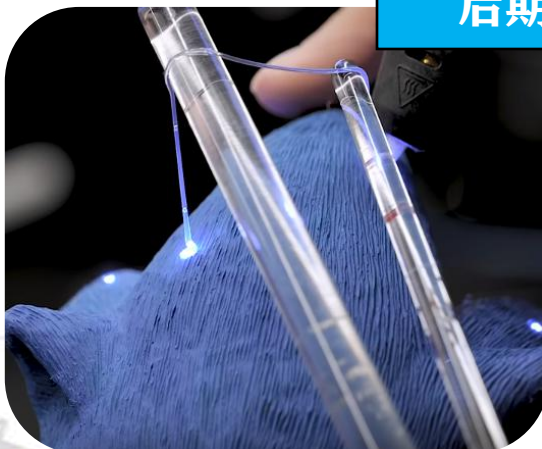
线条造型

发光造型

块粘结

细节修复

后期手工处理



提升原始打印精度

修改打印配置



Enable Ironing

Iron Only Highest Layer

Ironing Line Spacing

Ironing Flow

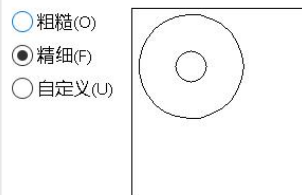
Ironing Inset

Ironing Speed

| | |
|-------------------------------------|------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | |
| <input type="checkbox"/> | |
| <input type="checkbox"/> | 0.2 mm |
| <input type="checkbox"/> | 20 % |
| <input type="checkbox"/> | 0.1 mm |
| <input type="checkbox"/> | 100.0 mm/s |

<https://www.youtube.com/watch?v=CzW45MphcK4>

提高STL文件精度



- ☐ 粗糙(O)
- ☒ 精细(F)
- ☐ 自定义(U)

☒ 保存文件前显示 STL 信息(W)

☐ 保存文件前预览(P)

三角形

误差:

公差: 0.02511804mm

角度

公差: 10.00000度

文件大小:

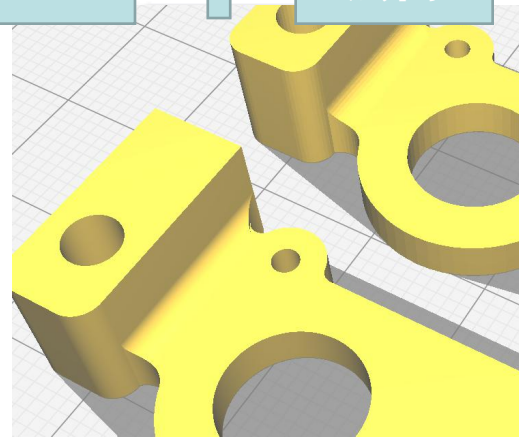
大小: 137 KB (141,084 字节)

大小: 2.40 MB (2,524,884 字节)

Iron



层高



默认打印



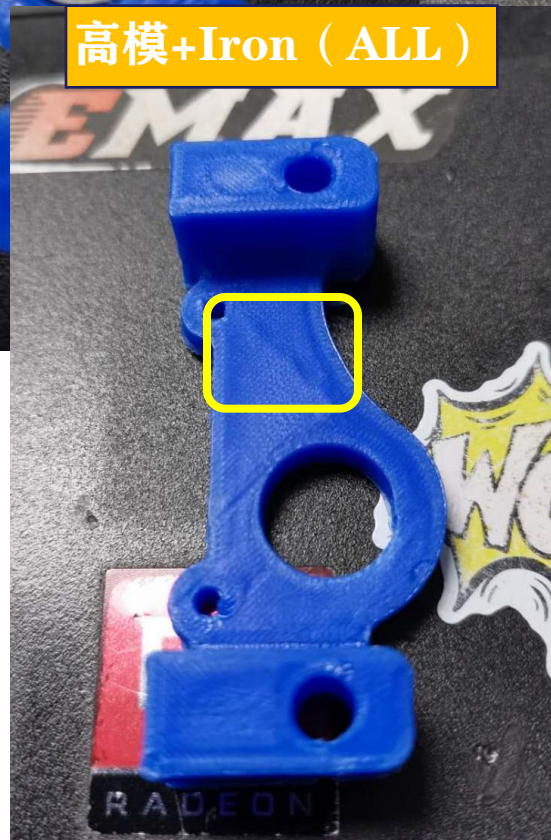
低模+Iron (Top)



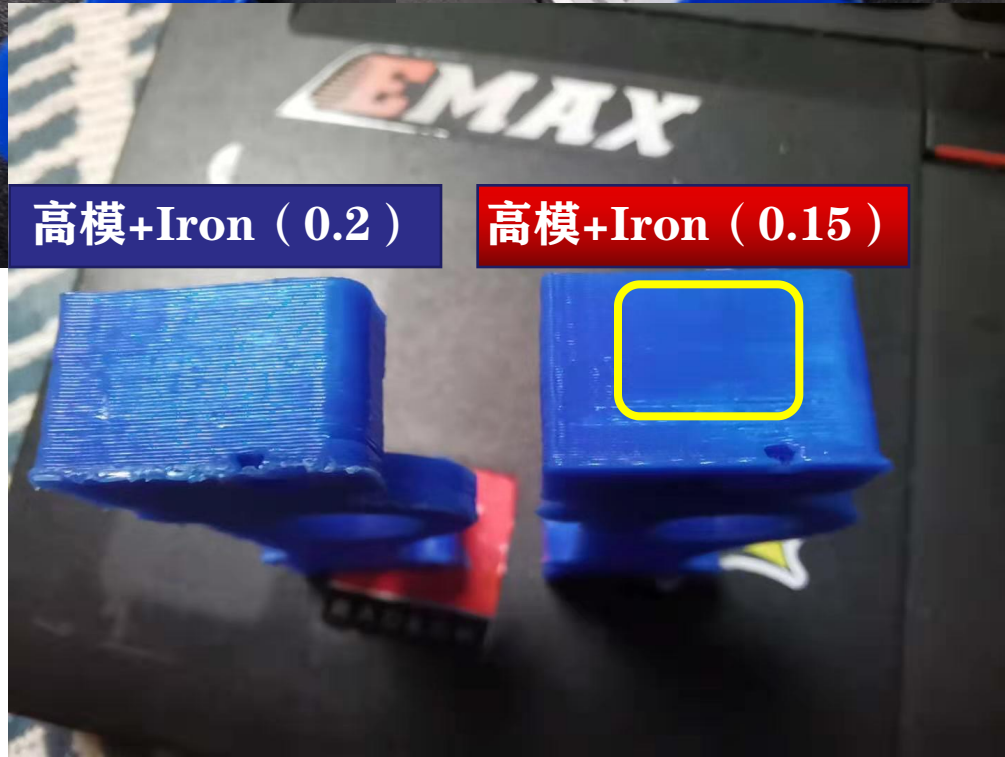
高模+Iron (Top)



高模+Iron (ALL)



高模+Iron (0.2)



高模+Iron (0.15)



模型组装

舵机



GDW RS0708/9g微型舵机大角度全钢齿轮/机器人/7公斤机械臂云台 [交易快照]

颜色分类: RS0708-180deg 飞机种类: 工厂直营店



K-power伟创 锁尾舵机 全铝高压高端 空心杯9g 高速DMC810 KPOWER [交易快照]

颜色分类: 桔色 飞机种类: 直升机



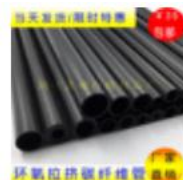
连杆



M2M3球头扣拉杆总成 球头连杆 球头总成 球头扣连杆头 10mm可调节 [交易快照]

颜色分类: M2拉杆 孔距40-55mm 飞机种类: 带螺丝螺母

碳管



碳纤维管/ 碳管/航模加强杆/风筝骨/圆管 碳纤维杆2-7mm之间多种包邮 [交易快照]

颜色分类: 4mm*2.5mm*1米 飞机种类: 碳纤维管

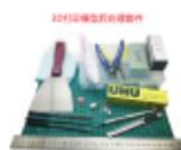


配件



进口 NSK 微型 F MF 法兰 迷你小轴承 内径 5mm 6mm 法兰盘轴承 [交易快照]

颜色分类: 内径5mm外径10mm厚度4mm 内径 (mm): 其他



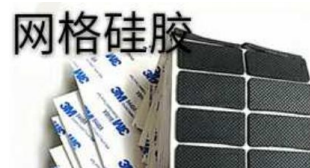
3D打印机后处理套件 机器维护套件 抛光处理工具 模型打磨工具 [交易快照]

颜色分类: 模型处理套件



包邮2CM 2.5CM 3CM 3.5CM厘米5V 12V 笔记本USB小风扇微型直流散热 [交易快照]

颜色分类: 2.5厘米5V



网格硅胶

总花销<1200RMB



机器人基本运动学

运动学正解

由关节角度计算腿末端在跨关节坐标系{H}下的三维位置
(用于机器人位姿估计和速度估计)

运动学逆解

由末端位置解算各关节角度
(用于机器人摆动腿轨迹跟踪, 基于位置的姿态调节和控制)

机器人动力学

由力计算关节所需力矩, 计算机构转动惯量
(用于机器人力控输出, 静力学和力矩平衡分析)



运动学正解

- DH法：实际就是立体几何成像中常用的平移矩阵变换

1) 原理清晰，易于推广

2) 矩阵运算存在冗余计算量

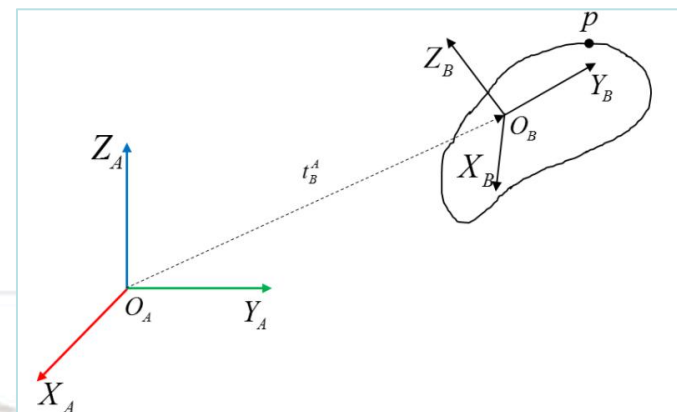
$$T_B^A = \begin{bmatrix} R_B^A & t_B^A \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}$$

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} R^T & -R^T t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}$$



$$T_A^C = T_B^C \cdot T_A^B$$

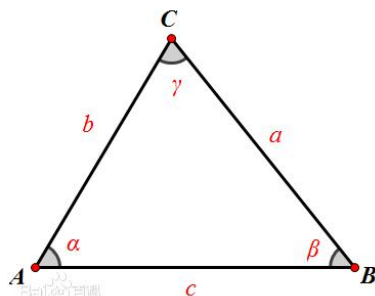
$$\tilde{p}_A = T_B^A \cdot \tilde{p}_B$$



- 几何法：借助常用的Sin、Cos和余弦定理求取数值解

1) 速度快原理简单

2) 推导复杂，角度正负号和方向容易混淆



$$\cos \alpha = \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc}$$

$$\cos \beta = \frac{c^2 + a^2 - b^2}{2ca}$$

$$\cos \gamma = \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab}$$

$$b^2 = c^2 + a^2 - 2ac \cos \beta$$

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos \alpha$$

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \gamma$$

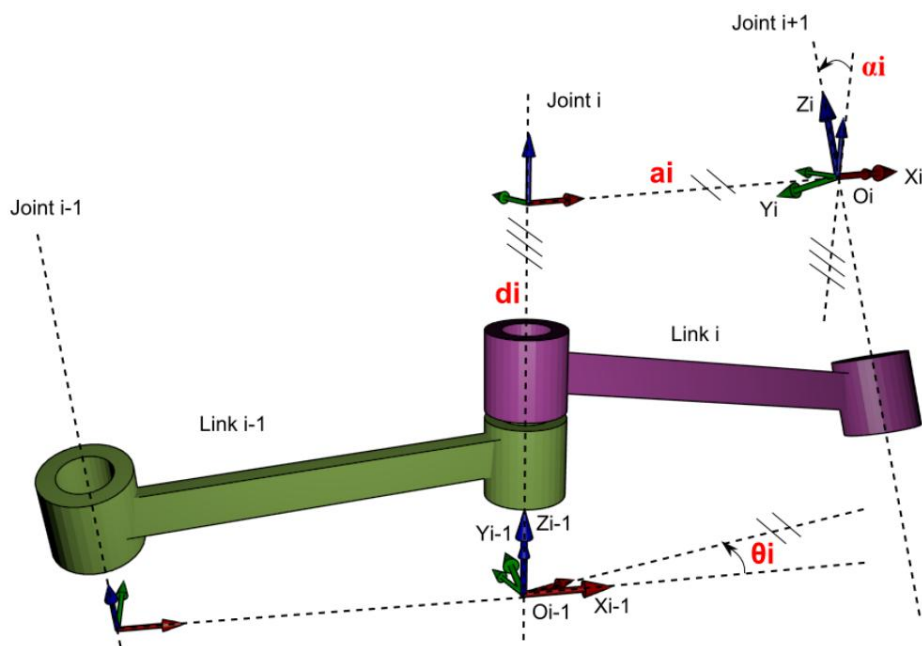
DH坐标系法

坐标系B原点在坐标系A中的坐标

$$\tilde{p}_A = T_B^A \cdot \tilde{p}_B$$

坐标系A原点在坐标系B中的位置

$$t_A^B = -R_A^B \cdot t_B^A = -(R_B^A)^T \cdot t_B^A$$



Sita: 关节角度

d: 关节宽度

a: 关节长度

alfa: 关节偏角

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

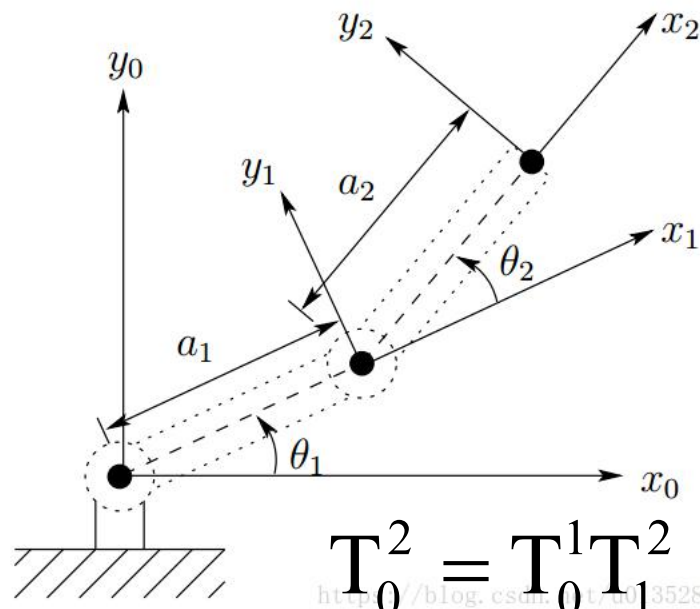
绘制连杆

列DH表

矩阵乘法

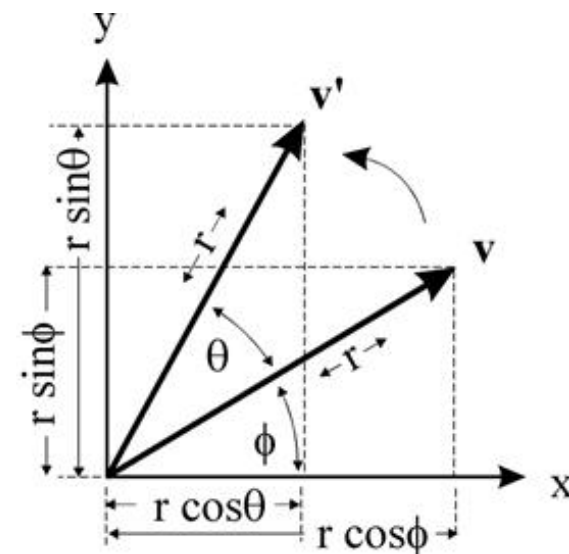
DH表

| Link | a_i | α_i | d_i | θ_i |
|------|-------|------------|-------|--------------|
| 1 | a_1 | 0 | 0 | θ_1^* |
| 2 | a_2 | 0 | 0 | θ_2^* |



几何法

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix}_{A0} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix}_{A0} + R_{A0}^{A1T} \begin{bmatrix} \cos \theta_2 a_2 \\ \sin \theta_2 a_2 \end{bmatrix}$$



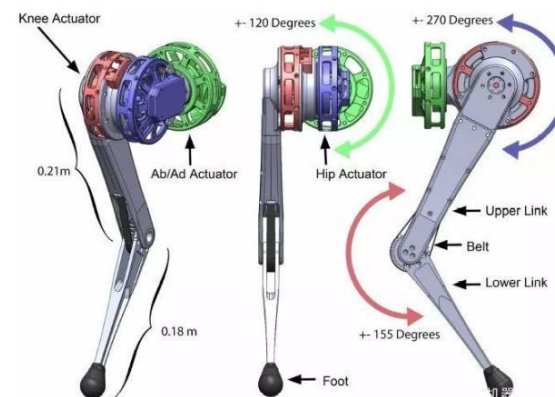
$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix}_{A0} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 a_1 \\ \sin \theta_1 a_1 \end{bmatrix} \quad R_{A0}^{A1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix}$$

运动学逆解

- 闭式解：直接采用几何知识求解

- 1) 速度快，仅需要正余旋函数运算

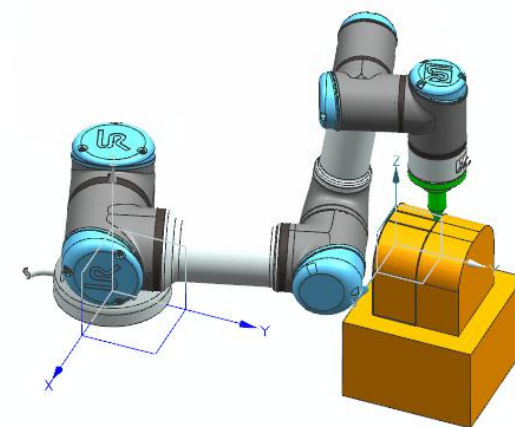
- 2) 无奇异，位置角度一一对应



- 数值解：采用递推和迭代方法求解

- 1) 效率低，受初始值影响

- 2) 多解筛选（能耗，速度，避障）



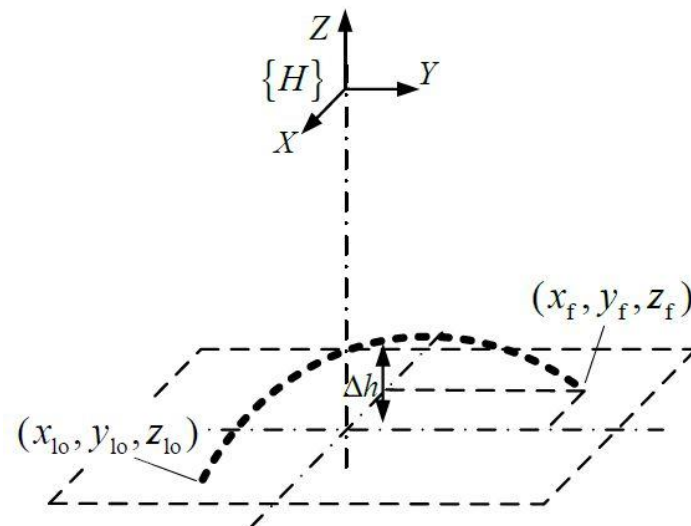
摆动腿控制

完成对末端轨迹实时的跟踪控制：

$[x \ y \ z] = \text{摆动轨迹}_t$

$[\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3] = f_1([x \ y \ z]_{\{H\}})$

舵机_{PWM} = $f_2([\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3])$



位姿估计

位姿控制

计算质心的机械角度，机械位置：

姿态角 = $LS(p_{\text{支撑腿}}^{\{B\}})$

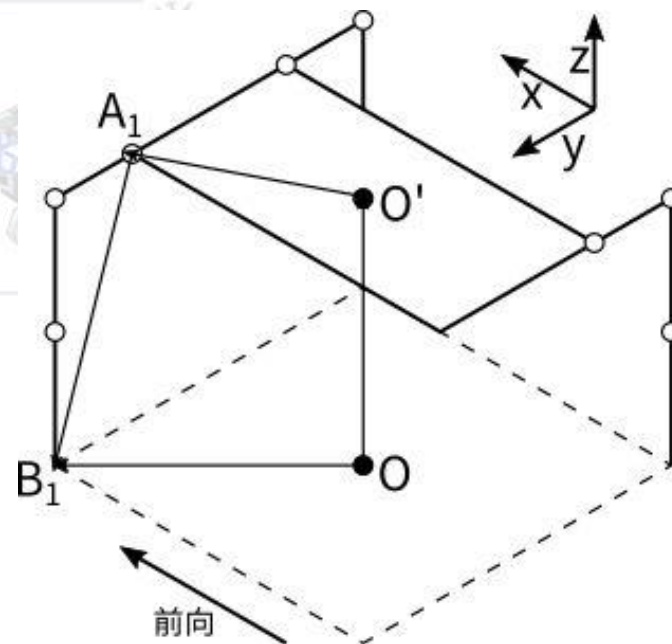
质心位置 = $f(p_{\text{支撑腿}}^{\{B\}})$

角速度

质心速度

计算支撑腿所需腿长：

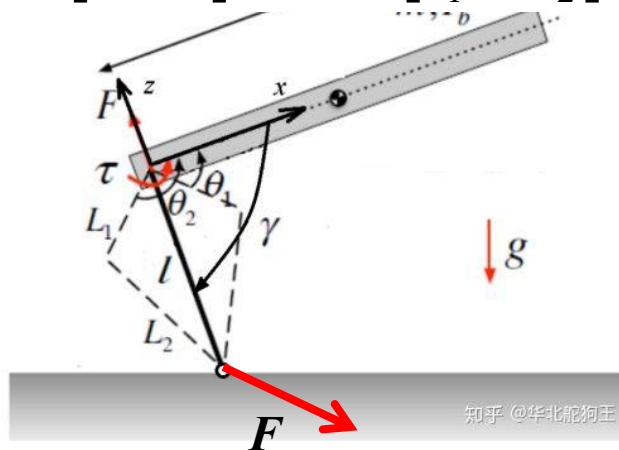
$p_{\text{支撑腿}}^{\{B\}} = f(\text{姿态角}, \text{质心位置})$



雅克比动力学

- 雅克比矩阵：机器人基础微分运动学，完成末端速度与关节角速度的空间映射
- 1) 由末端期望速度计算关节期望角度
 - 2) 由末端期望力输出计算关节力矩

$$\begin{bmatrix} x & z \end{bmatrix} = FK \{ \theta_1 \quad \theta_2 \}$$



$$\frac{\partial p}{\partial \theta} = J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial z}{\partial \theta_1} & \frac{\partial z}{\partial \theta_2} \end{bmatrix}$$

速度雅克比换算

$$\dot{p} = J \dot{\theta}$$

虚功原理/广义力

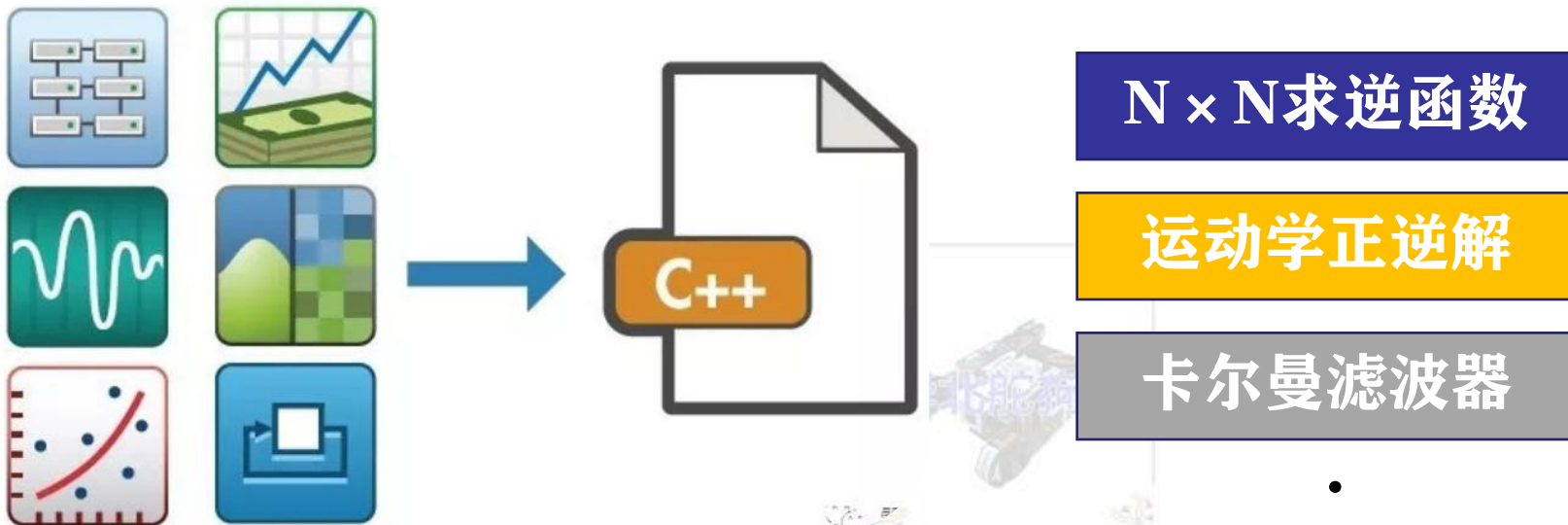
- 1) 关节无摩擦
- 2) 忽略连杆质量/惯量

力矩雅克比换算

$$\tau = J^T F$$

Matlab Coder代码导出

$$\dot{\theta} = J^{-1} \dot{p} \quad \longrightarrow \quad inv(J) = (J^T J)^{-1} J^T$$



注意:

- 1) 保证除法分母不为0
- 2) 反正余弦函数输入限幅在-1~1
- 3) 最终雅克比输出判断NAN做好保护

<http://news.eeworld.com.cn/mp/e/a51724.jsp>



下一节教程内容

- 1) AltiumDesigner9 原理图设计介绍
- 2) AltiumDesigner9 PCB设计介绍
- 3) 基于STM32F4的行走主控设计介绍
- 4) 物料导出采购与PCB加工焊接
- 5) 缩比模型供电与电气系统设计

