

第一讲-机器人动力学简介

潘阳 博士

目录

- 数学模型的定义与分类
- 机器人学科中的数学模型
- 机器人动力学的应用
- 机器人动力学的建模方法
- 机器人动力学仿真软件
- 机器人技术的发展与展望

数学模型的定义与分类

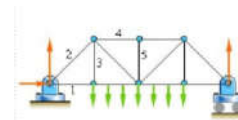
数学模型是使用数学概念和语言来对一个系统的描述。创建数学模型的过程叫做数学建模。模型会帮助解释一个系统，研究不同组成部分的影响，以及对行为做出预测。

静态模型(static)	vs	动态模型(dynamic)
线性系统(linear)	vs	非线性系统(nonlinear)
离散系统(discrete)	vs	连续系统(continuous)
显式系统(explicit)	vs	隐式系统(implicit)
确定系统(deterministic)	vs	随机系统(stochastic)
白箱模型(white box)	vs	黑箱模型(black box)

数学模型的定义与分类

静态模型(static)

- 只关心平衡态或平稳态 (static or steady)
- 与时间无关



静态桁架系统

动态模型(dynamic)

- 系统状态随时间改变
- 时间、状态、演化方程 (time, state manifold, evolution function)
- 演化方程为微分方程：

$$\dot{x} = v(x)$$

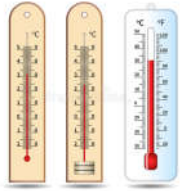
动态双摆系统

数学模型的定义与分类

线性模型(static)

- 物理量之间呈线性关系：

$$Ax = b$$

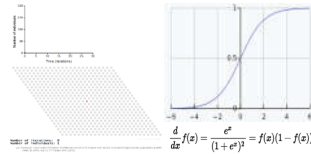


温度和水银高度为线性关系

非线性模型(dynamic)

- 物理量之间成非线性关系

$$y=f(x)$$

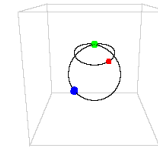


基于S曲线的人口预测模型

数学模型的定义与分类

离散模型(discrete model)

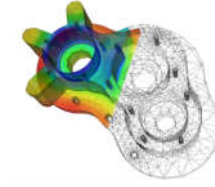
- 分析有限个物体



三体系统

连续模型(continuous model)

- 研究物理量的分布，比如温度、应力等
- 一般使用有限单元法求解



泵壳的温度分布

目录

- 数学模型的定义与分类
- 机器人学科中的数学模型**
- 机器人动力学的应用
- 机器人动力学的建模方法
- 机器人动力学仿真软件
- 机器人技术的发展与展望

机器人学科中的数学模型



轮式机器人



四旋翼



腿式机器人



工业机器人



delta机器人



stewart机器人

腿式、串联、并联机器人

- 机器人机构设计
- 机器人运动学模型
- 机器人动力学模型
- 机器人轨迹规划
- 机器人伺服控制

机器人学科中的数学模型

1. 机器人机构设计

串联机器人



- 特点:
- 工作空间大
 - 承载能力低
 - 精度低
 - 拓扑简单
 - 零件类型差异大

并联机器人



- 特点:
- 承载能力高
 - 刚度大
 - 精度高
 - 拓扑复杂
 - 零件类型少

机器人学科中的数学模型

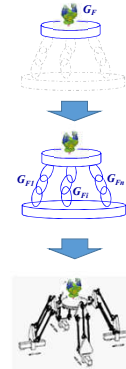
1. 机器人机构设计

机构是指为研究机器组成、运动原理，分析设计方法的抽象。

机构主要包含构件(Link)和运动副(joint)

机器人机构设计理论：

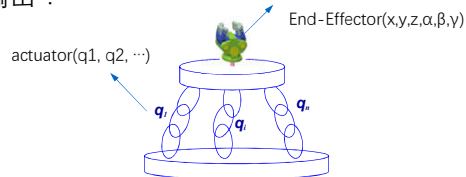
- 上海交大高峰老师的GF set 理论
- 螺旋理论
- 李群李代数
- 微分流型理论



机器人学科中的数学模型

1. 机器人机构设计

机器人输入与输出：



计算机器人自由度的G-K公式：

$$\text{dof} = \underbrace{m(N-1)}_{\text{rigid body freedoms}} - \underbrace{\sum_{i=1}^J c_i}_{\text{joint constraints}}$$

机器人学科中的数学模型

1. 机器人机构设计 (GF set理论中的机构运动学与动力学评价模型)

各向同性指标:

$$B = AA^T = \begin{bmatrix} h_1[I] & 0 \\ 0 & h_2[I] \end{bmatrix} = \text{diag}(h_1, h_2, \dots, h_1, h_2, \dots, h_2)$$

全域定量评价模型:

$$\eta_{\text{trans}} = \frac{\int_{\omega} \|\dot{v}_{\text{trans}}\|^2 d\omega}{\int_{\omega} d\omega}; \quad \eta_{\text{rot}} = \frac{\int_{\omega} \|\dot{v}_{\text{rot}}\|^2 d\omega}{\int_{\omega} d\omega}$$

输入输出可约特性:



提出了 $y=Ax$ 系统的转动与移动分离的解耦和各向同性定理。

解耦 各向同性	定理1:	如果 $A_r A_r^T = B_r$ 为对角阵，即满足 $A_r A_r^T = B_r = \text{diag}(b_{r11}, b_{r22}, \dots, b_{rn})$ ，则 y_r 解耦。
	定理2:	如果 $A_r A_r^T = B_r$ 为对角阵，即满足 $A_r A_r^T = B_r = \text{diag}(b_{r11}, b_{r22}, \dots, b_{rn})$ ，则 y_r 解耦。
	定理3:	如果 $AA^T = B$ 为对角阵，即满足 $AA^T = B = \text{diag}(b_{r11}, b_{r22}, \dots, b_{rn}, b_{t11}, b_{t22}, \dots, b_{tn})$ ，则 y 解耦，同时 y_r 与 y_t 也相互解耦。
	定理4:	如果 $A_r A_r^T = B_r$ 为对角元素相等的对角阵，即满足 $A_r A_r^T = h_r[I]$ ，则 y_r 各向同性。
	定理5:	如果 $A_r A_r^T = B_r$ 为对角元素相等的对角阵，即满足 $A_r A_r^T = h_r[I]$ ，则 y_r 各向同性。
	定理6:	如果 $A_r A_r^T$ 为对角阵，并满足 $AA^T = \begin{bmatrix} h_r[I] & 0 \\ 0 & h_t[I] \end{bmatrix} = \text{diag}(h_r, h_r, \dots, h_r, h_t, \dots, h_t)$ ，则 y 各向同性。
	定理7:	系统的各向同性度等于 条件数的倒数，即 $\mu_y = \frac{1}{K_y} = \frac{\min(\lambda_y)}{\max(\lambda_y)}$ ， $\mu_r = \frac{1}{K_r} = \frac{\min(\lambda_r)}{\max(\lambda_r)}$ 。 其中: $\lambda_y = (\lambda_{y1}, \lambda_{y2}, \dots, \lambda_{yn})$ 和 $\lambda_r = (\lambda_{r1}, \lambda_{r2}, \dots, \lambda_{rn})$ 分别为 A_r 和 A_r 的奇异值向量。

机器人学科中的数学模型

1. 机器人机构设计 (GF set理论中的机构运动学与动力学评价模型)

各向同性指标:

$$B = AA^T = \begin{bmatrix} h_1(I) & 0 \\ 0 & h_2(I) \end{bmatrix} \\ = \text{diag}(h_1, h_1, \dots, h_1, h_2, \dots, h_2)$$

全域定量评价模型:

$$\eta_{\omega} = \frac{\int \|\dot{\omega}\| d\omega}{\int d\omega}; \quad \eta_{\omega} = \frac{\int \|\dot{\omega}\| d\omega}{\int d\omega}$$

输入输出可约特性:

$$G_F \begin{bmatrix} a_{ij} \end{bmatrix} Q$$

末端特征 关联关系 输入变量

根据上述定理, 建立了广义速度、广义力、广义刚度和广义精度等各向同性评价指标。

各向同性评价	移动分量模型	转动分量模型
广义速度	$\mu_v = \frac{1}{K_v} = \frac{\min(\lambda_v)}{\max(\lambda_v)}$	$\mu_\omega = \frac{1}{K_\omega} = \frac{\min(\lambda_\omega)}{\max(\lambda_\omega)}$
广义力	$\mu_F = \frac{1}{K_F} = \frac{\min(\lambda_F)}{\max(\lambda_F)}$	$\mu_T = \frac{1}{K_T} = \frac{\min(\lambda_T)}{\max(\lambda_T)}$
广义刚度	$\mu_{D_v} = \frac{1}{K_{D_v}} = \frac{\min(\lambda_{D_v})}{\max(\lambda_{D_v})}$	$\mu_{D_\omega} = \frac{1}{K_{D_\omega}} = \frac{\min(\lambda_{D_\omega})}{\max(\lambda_{D_\omega})}$
广义精度	$\mu_{E_v} = \frac{1}{K_{E_v}} = \frac{\min(\lambda_{E_v})}{\max(\lambda_{E_v})}$	$\mu_{E_\omega} = \frac{1}{K_{E_\omega}} = \frac{\min(\lambda_{E_\omega})}{\max(\lambda_{E_\omega})}$

机器人学科中的数学模型

2. 机器人运动学

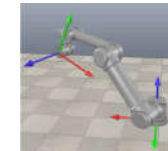
位置模型

正解: 输入 → 末端

反解: 末端 → 输入

机器人运动学的特点:

- 静态系统
- 非线性
- 串联机器人正解容易反解难
- 并联机器人反解容易正解难



串联机器人正运动学容易, 逆运动学难



并联机器人逆运动学容易, 正运动学难

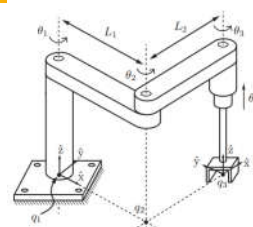
机器人学科中的数学模型

2. 机器人运动学

速度模型

正解: 输入 → 末端

反解: 末端 → 输入



$$\mathcal{V}_s = J_s(\theta) \dot{\theta}$$

$$J_s(\theta) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & L_1 s_1 & L_1 s_1 + L_2 s_{12} & 0 \\ 0 & -L_1 c_1 & -L_1 c_1 - L_2 c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

机器人运动学的特点:

- 静态系统
- 线性系统
- 一般使用Jacobian矩阵来求

机器人学科中的数学模型

3. 机器人动力学

三问题:

正问题: 力 → 加速度 $\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta})$

逆问题: 加速度 → 力 $\ddot{\theta} = M^{-1}(\theta)(\tau - h(\theta, \dot{\theta}))$

标定问题: 力与加速度 → 惯量

三要素:

时间: t

状态: $\theta, \dot{\theta}$

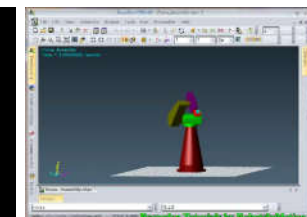
演化方程: $\ddot{\theta} = M^{-1}(\theta)(\tau - h(\theta, \dot{\theta}))$

动力学的特点

- 动态系统
- 线性系统 (仿射变换)
- 微分方程



Puma机器人逆动力学



Puma机器人正动力学

机器人学科中的数学模型

4. 机器人轨迹规划

时间曲线： $\theta(t)$

空间曲线： $\theta(s) \quad s: [0, T] \rightarrow [0, 1]$

$$\dot{\theta} = \frac{d\theta}{ds} \dot{s},$$

$$\ddot{\theta} = \frac{d\theta}{ds} \ddot{s} + \frac{d^2\theta}{ds^2} \dot{s}^2$$

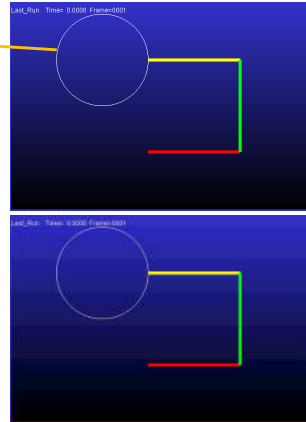
$s(t)$

空间轨迹:
 $x=r*\sin(s)$
 $y=r*\cos(s)$

时间轨迹:
 $x=r*\sin(s)$
 $y=r*\cos(s)$
 $s=2\pi*t$

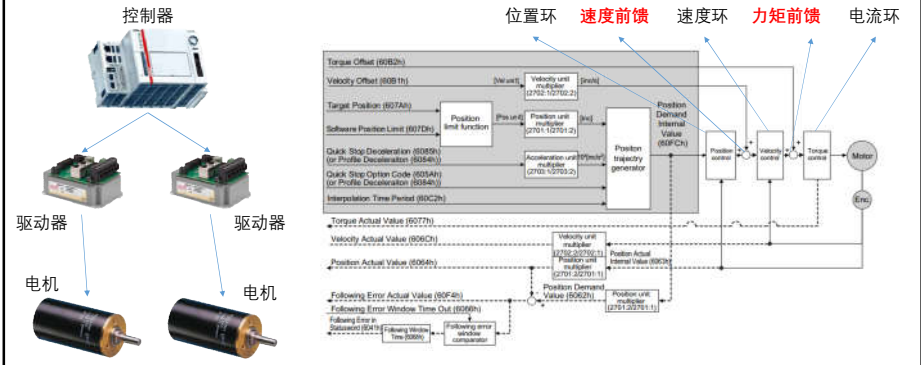
空间曲线根据任务需求

时间曲线根据机器人特性优化



机器人学科中的数学模型

5. 机器人伺服控制

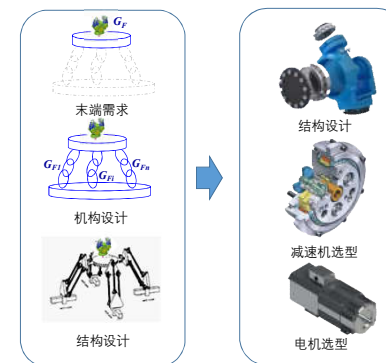


目录

- 数学模型的定义与分类
- 机器人学科中的数学模型
- **机器人动力学的应用**
- 机器人动力学的建模方法
- 机器人动力学仿真软件
- 机器人技术的发展与展望

机器人动力学模型的应用

1. 机器人动力学可以为机构设计提供参考



传统方法：

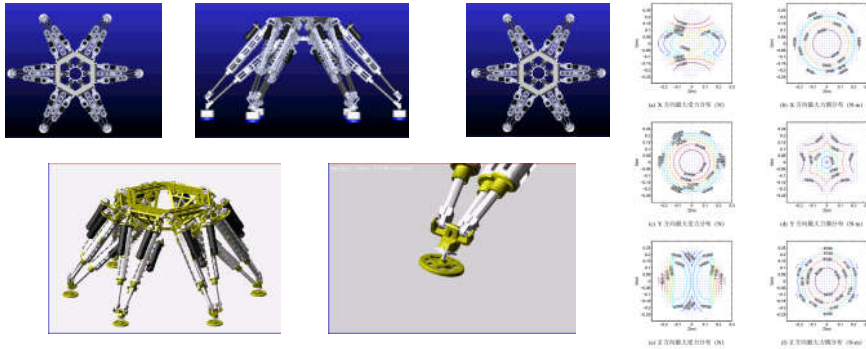
- 惯量匹配
- 惯量等效
- 根据经验、实验来设计

动力学方法：

- 动力学仿真
- 动力学逆问题
- 根据末端轨迹确定关节力矩
- 根据关节力矩、加速度选型设计

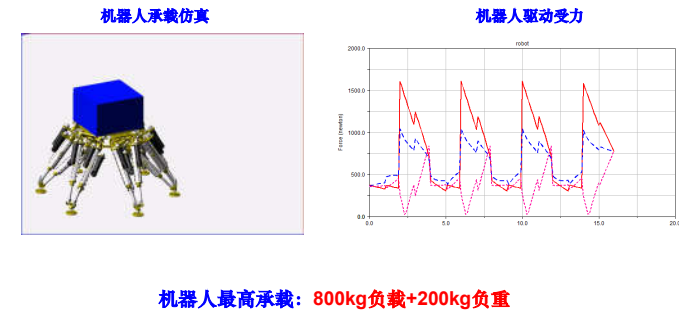
机器人动力学模型的应用

1. 机器人动力学可以为机构设计提供参考



机器人动力学模型的应用

1. 机器人动力学可以为机构设计提供参考



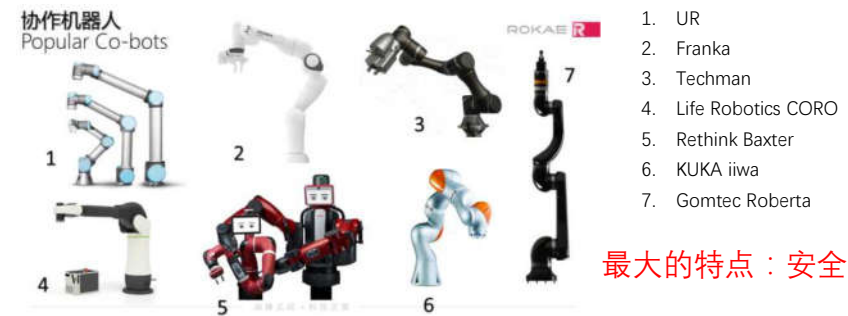
机器人动力学模型的应用

1. 机器人动力学可以为机构设计提供参考



机器人动力学模型的应用

2. 机器人动力学可以为 人机协作提供力控保障



机器人动力学模型的应用

2. 机器人动力学可以为人机协作提供力控保障

协作机器人特点：

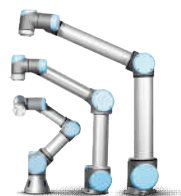
1. 采用力控模式
2. 实时检测外力
3. 易于拖动
4. 无外载时保持原位
5. 低速度、低惯量、低负载
6. 补偿重力、摩擦力



KUKA iiwa
关节力矩传感器



ABB Yumi
电流检测



UR 3, 5, 10
双编码器 检测变形

机器人动力学模型的应用

2. 机器人动力学可以为人机协作提供力控保障



ABB Yumi机器人拖动示教

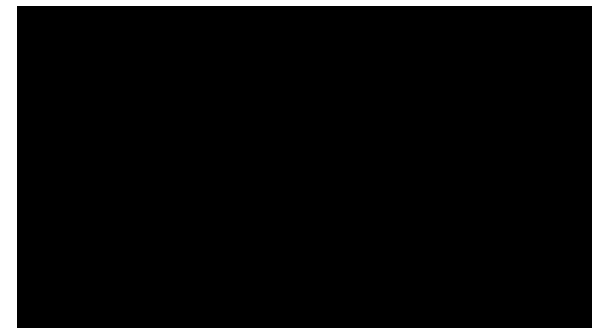


ABB Yumi机器人

机器人动力学模型的应用

3. 机器人动力学可以协助机器人保持平衡



波士顿动力Atlas机器人

机器人动力学模型的应用

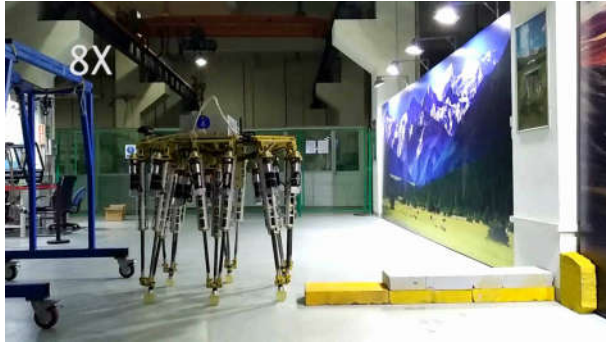
3. 机器人动力学可以协助机器人保持平衡



波士顿动力Atlas机器人

机器人动力学模型的应用

3. 机器人动力学可以协助机器人保持平衡

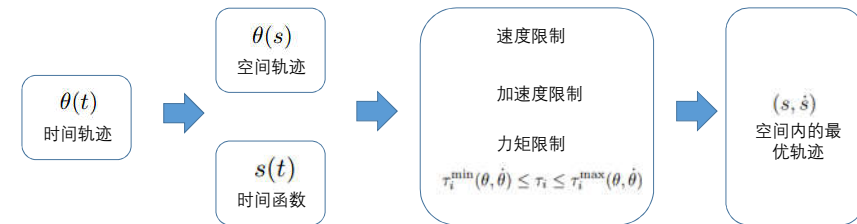


上海交大六足机器人电流检测外力

机器人动力学模型的应用

4. 机器人动力学可以让机器人运动的更快

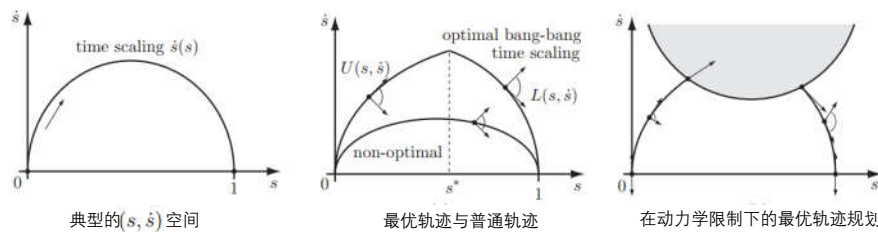
时间最优轨迹规划 (Time Optimal Plan) :



机器人动力学模型的应用

4. 机器人动力学可以让机器人运动的更快

时间最优轨迹规划 (Time Optimal Plan) :



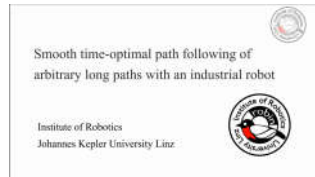
机器人动力学模型的应用

4. 机器人动力学可以让机器人运动的更快



机器人动力学模型的应用

4. 机器人动力学可以让机器人运动的更快



Jerk Limited And Time Optimal Point To Point Trajectories

14 consecutive trajectories for 6 DOF industrial robot computed with dynamic programming algorithm

Institute of Robotics
Johannes Kepler University Linz

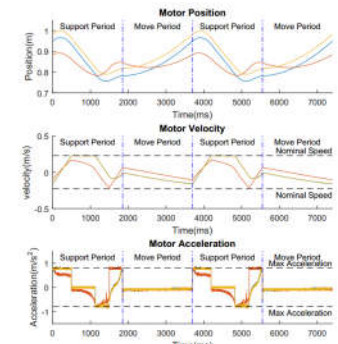
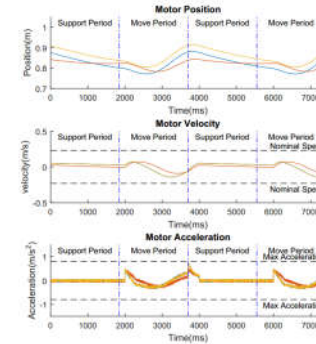


Waiter Motion Problem with 4 cups



机器人动力学模型的应用

4. 机器人动力学可以让机器人运动的更快



机器人动力学模型的应用

4. 机器人动力学可以让机器人运动的更快

更精准 OptiMotion
基于全动力学模型的最优规划，包括高精度动力学建模与参数辨识，OTOC在规划阶段采用高阶连续技术，CycleTime可以比传统少至一个轴位于是最大加速状态，从而获得机器人并能光鲜的最低节拍时间。



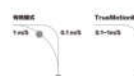
更柔顺 SoftMotion
支持基于H2/H∞控制的高精度力控、柔顺控制、移动中的以及柔性传感器的移动中控制。用户可以根据实际需求选择不同方案。



更协同 SyncMotion
可适配内置第七轴运动器，支持多轴联动控制，高精度电液驱动与同步运动，极大扩展机器人的运动范围和应用领域。



更精准 TrueMotion
融合与速度无关的自适应技术，高精度速度补偿与位置补偿技术，TrueMotion保证机器人在任何速度下都可以达到同样的运动精度，所以更精准。



更安全 SafeMotion
内置独立安全系统，支持碰撞保护功能，丰富碰撞检测区域、速度与姿态限制。



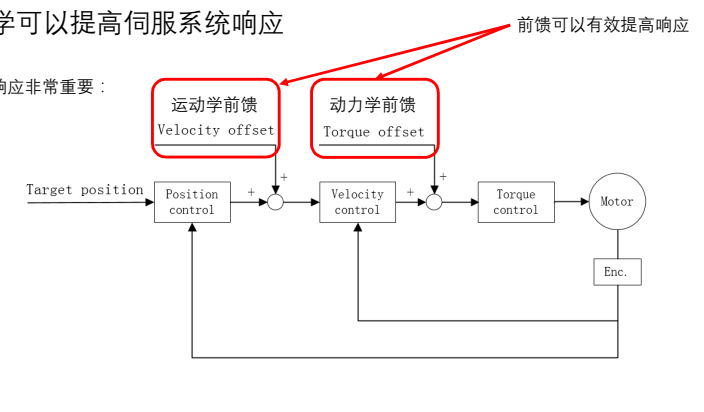
更开放 ROKAEConnect
支持C++/Python两种开发语言，最高通信频率可达1000Hz，内置独家Profinet协议接入工业，同时支持EtherCAT、EtherCAT和EtherNet/IP。



机器人动力学模型的应用

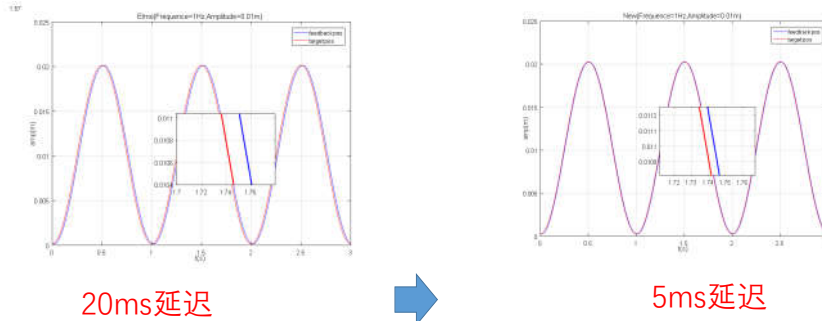
5. 机器人动力学可以提高伺服系统响应

在追求体验的场景，响应非常重要：



机器人动力学模型的应用

5. 机器人动力学可以提高伺服系统响应



机器人动力学模型的应用

5. 机器人动力学可以提高伺服系统响应



上海新纪元主动减振平台

机器人动力学模型的应用

5. 机器人动力学可以提高伺服系统响应



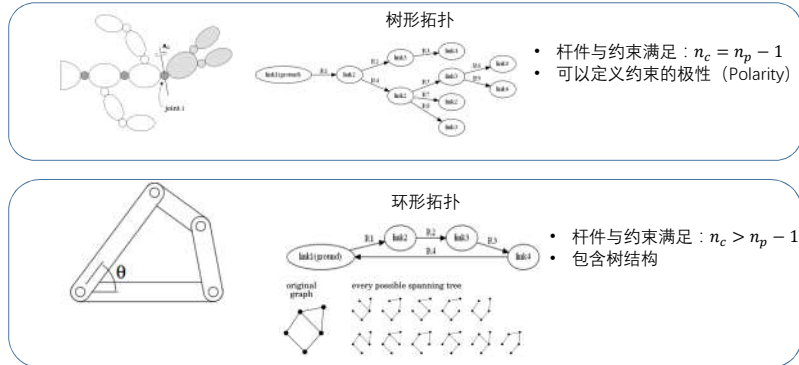
上海新纪元主动减振平台

目录

- 数学模型的定义与分类
- 机器人学科中的数学模型
- 机器人动力学的应用
- 机器人动力学的建模方法
- 机器人动力学仿真软件
- 机器人技术的发展与展望

机器人动力学的建模方法

机器人机构拓扑分类



机器人动力学的建模方法

机器人动力学建模方法

拉格朗日法 (Lagrangian Formulation)

引入拉格朗日函数：
 $\mathcal{L}(q_1, q_2, \dots, q_n; \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n, t)$

引入势能函数：
 $\mathcal{L} = T - V$

产生N个二阶方程：
 $\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} = Q_i$

牛顿欧拉法 (Newton-Euler Formulation)

单个杆件平衡方程：
 $\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta})$

递归关系：
 $M_{i,i-1} = M_i^{-1} M_{i-1}$

递归计算：

```

while forward recursion do
  T0(i),i = function of qi
  Vi = AdT0(i),iT V0(i) + Si} \ddot{q}_i
  Fi = AdT0(i),iT F0(i) + mi} Si} \ddot{q}_i + Si} \dot{q}_i + Si} \ddot{q}_i
end while
while backward recursion do
  Fi-1 = Zi Vi - mi-1 Zi \ddot{q}_i - Fi-1^{ext} + \sum_{k \in \mathcal{K}(i)} Ad_{Ti-1,k}^T F_k
  \tau_i = Si^T Fi-1}
end while
  
```

其他方法

凯恩法：

R/W方法：

高斯原理法：

空间向量法：

机器人动力学的建模方法

树形拓扑的动力学计算复杂度

	拉格朗日法 (Lagrangian Formulation)	牛顿欧拉法 (Newton-Euler Formulation)
树形正解	$O(N)$	$O(N)$
树形反解	$O(N)$	$O(N)$
环形正解	$O(N^3)$	$O(N^3)$
环形反解	$O(N^3)$	$O(N^3)$

机器人动力学的建模方法

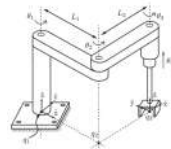
机器人动力学的研究对象



机器人动力学的建模方法

机器人动力学中的已知量与未知量

	固有属性	运动学求解的变量	动力学的未知量
外力 (Force)	重力		外力、摩擦力、科氏力……
杆件 (Part)	惯量	位置、速度	加速度
驱动 (Motion)		位置、速度	约束力、加速度
关节 (Joint)		位置、速度	约束力、加速度



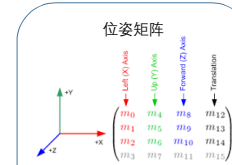
串联机构杆件位置好求



并联机构杆件位置多于驱动位置

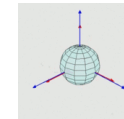
机器人动力学的建模方法

杆件位置表达



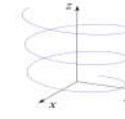
- 位姿矩阵特点：
- 容易求逆： $RR^T = I$
 - 导数有意义： $\dot{R} = \omega \times R$
 - 可以连乘：
 - 容易对点位置、线速度、角速度等做变换
 - 不容易求转轴
 - 物理意义不明显
 - 占用空间大

欧拉角矩阵



- 欧拉角特点：
- 物理意义明显
 - 313容易求逆，321难以求逆
 - 导数无明确意义
 - 无法连乘
 - 不容易求转轴
 - 无法对点位置、线速度等直接做变换
 - 有奇异点的问题

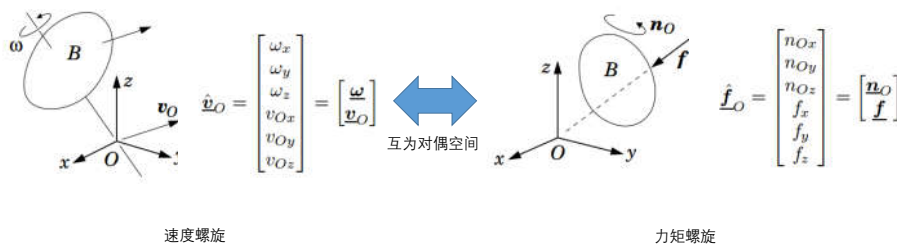
单位四元数



- 单位四元数特点：
- 物理意义明显 $q = [\cos(\frac{\theta}{2}), \sin(\frac{\theta}{2})\vec{p}]$
 - 容易求逆
 - 导数无明确意义
 - 可以连乘
 - 容易求转轴
 - 无法对点位置、线速度等直接做变换

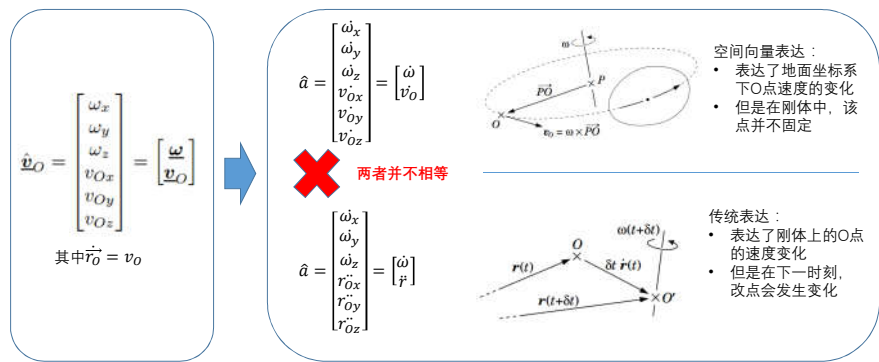
机器人动力学的建模方法

速度与力矩的表达 (wrench and twist)



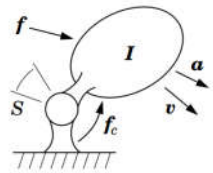
机器人动力学的建模方法

加速度的表达 (wrench and twist)



机器人动力学的建模方法

约束的表达



转动约束

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Twist 子空间

and

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Wrench子空间

机器人动力学的建模方法

杆件惯量的表达

$${}^o I = \int \begin{bmatrix} \bar{E} & -\bar{r} \times \\ \bar{r} \times & -\bar{r} \times \bar{r} \times \end{bmatrix} dm = \int \begin{bmatrix} 1 & & & z & -y \\ & 1 & -z & y & x \\ & -z & y & y^2 + z^2 & -x \\ & y & y^2 + z^2 & -xy & -xz \\ z & -x & -xy & x^2 + z^2 & -yz \\ -y & x & -xz & -yz & x^2 + y^2 \end{bmatrix} dm = \begin{bmatrix} \bar{E} & -\bar{c} \times \\ \bar{c} \times & \bar{I}_I \end{bmatrix}$$

杆件惯量的坐标系转换：

$${}^o I = {}^o T_A {}^A I ({}^o T_A)^T$$

其中：

$${}^o T_A = \begin{bmatrix} \bar{R} & 0 \\ \bar{p} \times \bar{R} & \bar{R} \end{bmatrix}$$

机器人动力学的建模方法

杆件平衡方程：

没有科氏力！

$$f + f_c + f_g = I a + v \times^* I v$$

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_{N_B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & I_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & I_{N_B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{N_B} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_{N_B} \end{bmatrix}$$

关节约束方程：

$$T^T a + \dot{T}^T v = 0$$

$$a_j = \begin{bmatrix} a_{j1} \\ \vdots \\ a_{jN_j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{s(1)} - a_{p(1)} \\ \vdots \\ a_{s(N_j)} - a_{p(N_j)} \end{bmatrix} = P^T a$$

通用方程形式：

$$\begin{bmatrix} I & T \\ T^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ -\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f - p \\ -\dot{T}^T v \end{bmatrix}$$

机器人动力学的建模方法

推荐的书单：

- 《Rigid Body Dynamics Algorithms》——Roy Featherstone
- 《Geometric Fundamentals of Robotics》——J.M. Selig
- 《MODERN ROBOTICS》——Kevin M. Lynch and Frank C. Park

推荐的论文：

《A Beginner's Guide to 6-D Vectors》—— Roy Featherstone

目录

- 数学模型的定义与分类
- 机器人学科中的数学模型
- 机器人动力学的应用
- 机器人动力学的建模方法
- **机器人动力学仿真软件**
- 机器人技术的发展与展望

机器人动力学仿真软件

常见物理引擎或求解器：

实时物理引擎

主要用于游戏产业

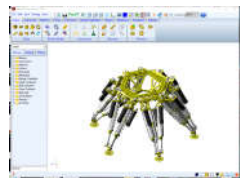
1. Havok
2. PhysX
3. Bullet
4. ODE
5. TOKAMAK
6. Newton
7. Simple Physics Engine

高精度物理引擎

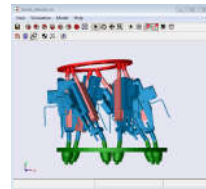
主要用于科研、工业界

1. Adams
2. Recurdyn
3. Matlab/Simmechanics

机器人动力学仿真软件



Adams



Matlab/Simmechanics



Recurdyn



V-REP

机器人动力学仿真软件

Recurdyn (recursive dynamic) 仿真软件是韩国function bay公司开发的一个基于递归算法的多体动力学系统仿真软件。其采用相对坐标系运动方程。适合行业主要是通用机械领域、传送机械、汽车、航空航天、兵器行业、电子电器领域的仿真分析。recurdyn主要处理机构、结构、控制、液压、摩擦、润滑、疲劳、可靠性方面的问题。其中机构方面能处理刚体机构、基于小变形假设的模态柔性体机构以及基于有限元理论的大变形柔性机构；结构方面能和有限元进行结合处理动态有限元问题；另外其专有的液压、摩擦、皮带、齿轮、履带、链传动、轮胎、活塞、曲柄、配气机构、媒介机构等模块都直接提供建立好的模型供用户选择而无需重新建模；自带求解器模块，后处理模块还支持二次开发。

- Rigid and Flexible [Multi-Body Dynamic](#) Analysis
- Kinematic Analysis
- Static Analysis
- Design Studies and Design of Experiments
- Sensitivity Analysis
- Vibration (Linear) Analysis

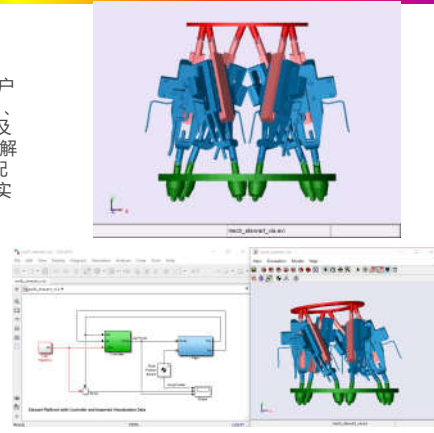


腿式机器人的动力学仿真

机器人动力学仿真软件

Simscape Multibody™ 提供多体动力学的3D仿真环境，可用于机器人、汽车悬挂、建造设备、飞机起落架等。用户可以在Simulink中建立杆件 (bodies)、关节 (joints)、约束 (constraints)、力与力矩 (force elements) 以及传感器 (sensors) 等。Simscape Multibody 建立并求解整个机械系统的微分方程。用户可以导入建好的CAD装配模型，包括所有的质量、惯量、关节、约束以及3D几何实体等。自动生成的3D仿真可以让用户轻易的可视化。

- 可以借助大量的Simulink的功能
- 对控制系统仿真 (电机、液压系统、传感器等)
- 方便分析
- 可以结合RTX实时系统等
- 容易实现算法



机器人动力学仿真软件

VREP(virtual robot experiment platform) 是机器人仿真器里的“瑞士军刀”，主要特点如下：

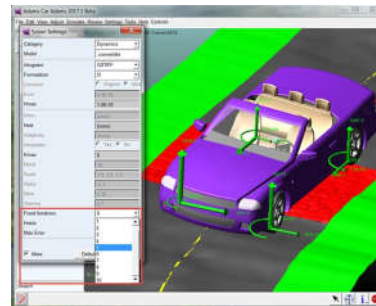
- 跨平台 (Windows, MacOS, Linux)
- 六种编程方法 (嵌入式脚本、插件、附加组件、ROS节点、远程客户端应用编程接口、或自定义的解决方案)
- 七种编程语言 (C/C++, Python, Java, Lua, Matlab, Octave, 和 Urbi)
- 超过400种不同的应用编程接口函数
- 100项ROS服务、30个发布类型、25个ROS订阅类型、可拓展
- 4个物理引擎 (ODE, Bullet, Vortex, Newton)
- 完整的运动学解算器 (对于任何机构的逆运动学和正运动学)
- 路径规划 (在2到6维中的完整约束、对于车式车辆的非完整约束)
- 机器人、机器人学、仿真器、仿真、运动学、动力学、路径规划、最短距离计算、碰撞检测、视觉传感器、图像处理、接近传感器、油漆分散仿真)
-



机器人动力学仿真软件

ADAMS(Automatic Dynamic Analysis of Mechanical System) 作为世界上使用最广泛的多体动力学 (MBD) 软件，Adams 可帮助工程师研究运动部件的动力学特性以及在整个机械系统内部荷载和作用力的分布情况。凭借广泛的分析能力，Adams 可充分利用高性能计算环境对大型问题进行优化。利用多体动力学求解技术，Adams 仅用 FEA 求解所需的小部分时间便可完成非线性动力学中的运行。通过更准确地评估载荷和作用力在各种运动及工作环境中的变化，Adams 仿真所计算的载荷和作用力改进了 FEA 的精度。Adams 提供的可选模块使用户能够将机械部件、气动、液压、电子及控制系统技术集成在一起，用于构建及试验虚拟样机，从而准确地了解这些系统之间的相互作用。

- Adams/View
- Adams/Control
- Adams/Mechatronics
- Adams/Flex
- Adams/Durability
- Adams/Vibration
- Adams/Machinery
- Adams/Real Time
-



机器人动力学仿真软件

MSC Software | CASE STUDY

MSC Software

Case Study: Shanghai Jiao Tong University

Chinese University Develops Legged Robot for Rescue Operations in Nuclear Plants

Overview

Shanghai Jiao Tong University (SJTU) has developed a legged robot for rescue operations in nuclear plants. The robot is designed to be able to navigate through complex environments and perform tasks such as inspecting and repairing equipment. The robot is based on the ADAMS software, which allows for the simulation of the robot's movement and the forces acting on it. This enables the designers to optimize the robot's design and ensure that it can perform its intended functions reliably. The robot is currently being tested in a laboratory setting, and the results of these tests are being used to refine the design and improve the robot's performance.

"If we had not used Adams to optimize the design prior to building the prototype, we would probably have needed five additional prototypes at a cost of \$150,000 each to get the design right. With Adams, the first prototype worked exactly as intended so we did not have to make a single change."

Dr. Hong-Ping, Mechanical Engineering Professor, Shanghai Jiao Tong University

Challenges

The first challenge was the complexity of the robot's design. The robot had to be able to move in a variety of ways, including walking, running, and jumping. This required a high degree of flexibility in the design, which was achieved through the use of ADAMS. The second challenge was the need to ensure that the robot was able to operate in a nuclear environment. This required the use of materials that were resistant to radiation and the design of a system that could protect the robot from radioactive contamination.

Solutions/Validation

The solution was to use ADAMS to simulate the robot's movement and the forces acting on it. This allowed the designers to optimize the robot's design and ensure that it could perform its intended functions reliably. The validation was performed by building a prototype of the robot and testing it in a laboratory setting. The results of these tests were used to refine the design and improve the robot's performance.

Key Highlights

Product Name

Shanghai Jiao Tong University

Benefits

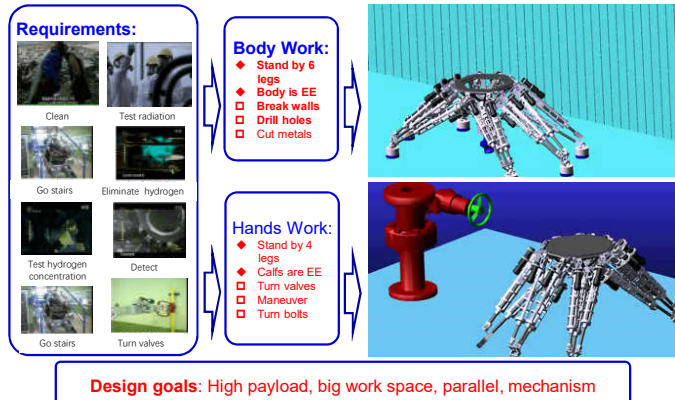
- The robot was able to move in a variety of ways, including walking, running, and jumping.
- The robot was able to operate in a nuclear environment.
- The robot was able to perform tasks such as inspecting and repairing equipment.

Results

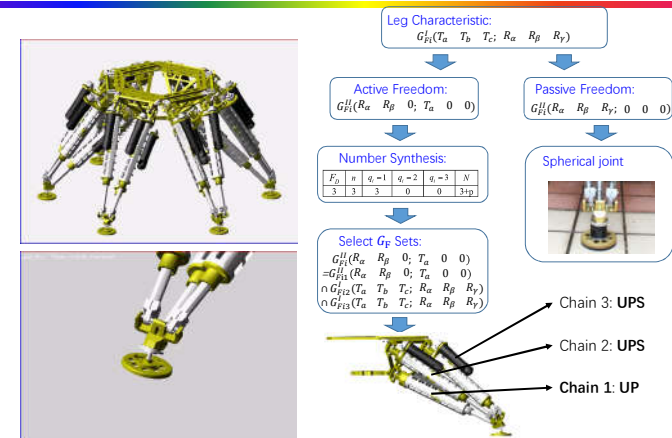
The results of the tests showed that the robot was able to move in a variety of ways, including walking, running, and jumping. The robot was also able to operate in a nuclear environment and perform tasks such as inspecting and repairing equipment. The results of these tests were used to refine the design and improve the robot's performance.

MSC 公司专门采访过我在交大期间做机器人的成果

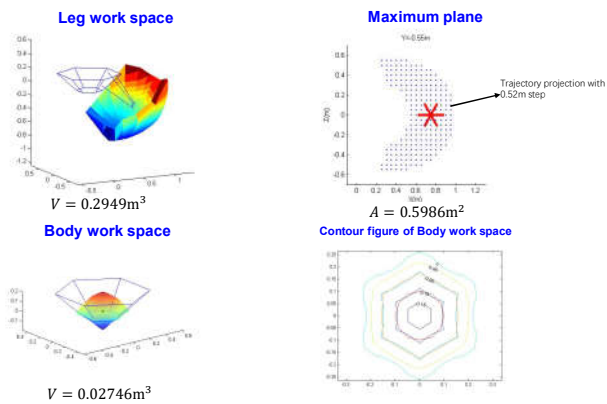
机器人动力学仿真软件



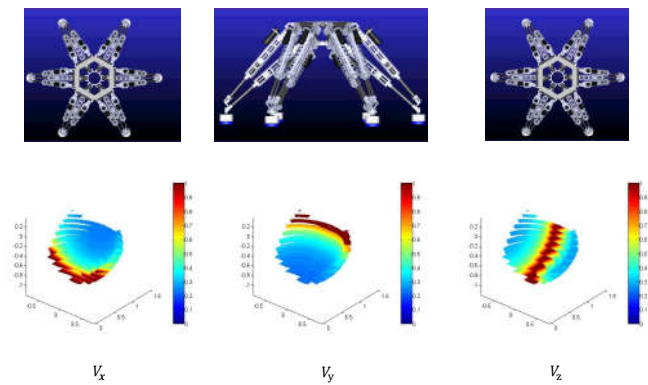
机器人动力学仿真软件



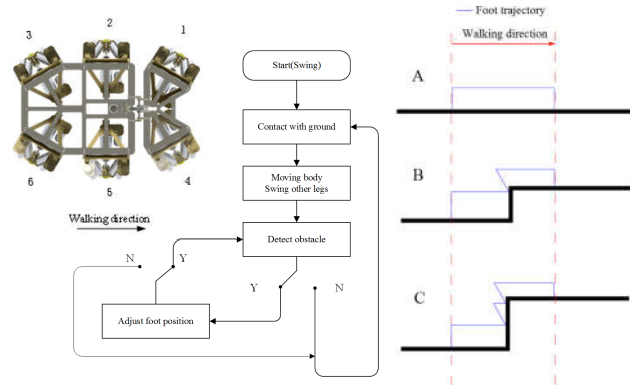
机器人动力学仿真软件



机器人动力学仿真软件



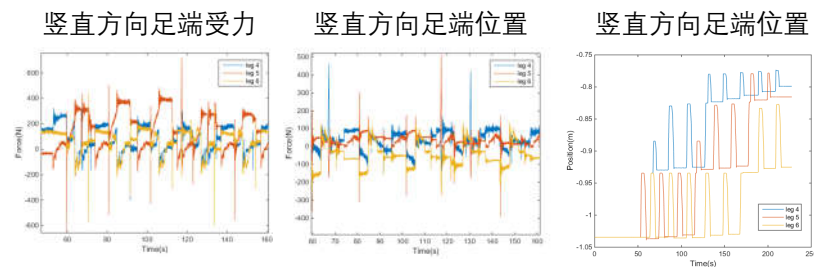
机器人动力学仿真软件



机器人动力学仿真软件



机器人动力学仿真软件



目录

- 数学模型的定义与分类
- 机器人学科中的数学模型
- 机器人动力学的应用
- 机器人动力学的建模方法
- 机器人动力学仿真软件
- 机器人力控的发展趋势

机器人领域力控的发展趋势

参与过的项目1：六足机器人（1款8代）

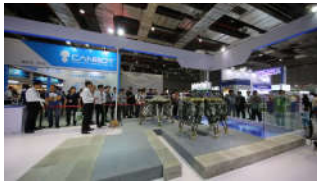


力传感器控制



视觉控制

走沙石路



机器人领域力控的发展趋势



MSC 公司专门采访过
我在交大期间做机器
人的成果

机器人领域力控的发展趋势

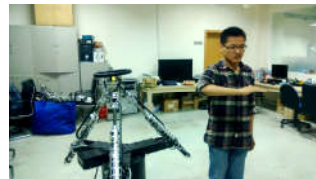
参与过的项目2：三支链并联机械臂



平板控制

手柄控制

手势控制



机器人领域力控的发展趋势

其他有趣的设备：stewart平台与6轴机械臂

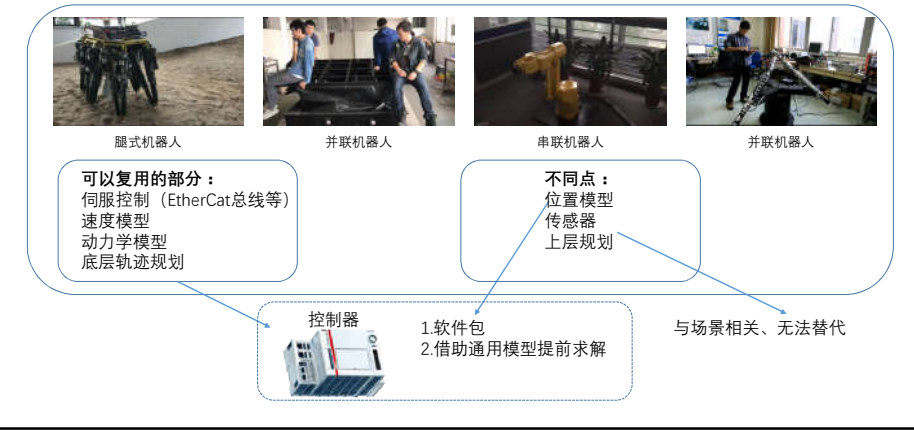


Stewart平台



6轴机械臂

机器人领域力控的发展趋势



机器人领域力控的发展趋势

前期的一些积累：<https://github.com/py0330/aris>

aris简介
aris的简介请参考 <http://106.15.224.250/>

功能简介
aris主要包括两个功能：
• 机器人建模、仿真、规划、运动学与动力学
 o 可以让用户针对串联机构、并联机构、混合机构、六轴机械手、SCARA机器人、Stewart等任意机器人机构和建模
 o 可以自动建立位置正解、速度正解等动力学模型
 o 可以自动建立机器人速度、力或力矩等动力学逆解模型
 o 运动学位置模型需要迭代计算，不建议在实时循环中直接使用，用户可以自己针对机构进行重联，从而实时使用
 o 运动学速度模型需要迭代计算，不建议在实时循环中直接使用，Stewart时导仅需0.03ms左右
 o 可以生成Adams模型等，便于用户比较结果
• 机器人控制策略
 o 支持Linux、Windows实时系统，以及EtherCAT，可以实时控制机器人使用
 o 支持用户自己编写命令控制机器人（比如moveC、moveL等）

安装
aris使用Cmake作为构建工具，可以在平台使用，源代码完全基于标准C++ 14编写，并在以下编译器下进行过测试：
• Visual Studio 2015
• gcc/g++ 5.4.1
• clang/clang++ 3.8

计算效率

	3R	6R	Stewart
位置正解	1.22×10^{-5}	5.31×10^{-5}	1.87×10^{-4}
位置反解	2.42×10^{-5}	5.63×10^{-5}	1.40×10^{-4}
速度正解	2.40×10^{-6}	4.37×10^{-6}	2.18×10^{-5}
速度反解	3.28×10^{-6}	5.80×10^{-6}	2.04×10^{-5}
动力学正解	3.41×10^{-6}	8.34×10^{-6}	2.99×10^{-5}
动力学反解	5.86×10^{-6}	1.17×10^{-5}	3.48×10^{-5}

机器人领域力控的发展趋势

发展趋势1，协作机器人飞速发展

据巴克莱银行的生产资料分析师估计，从2015年到2025年的短短10年间，协作机器人市场将从1.16亿美元增长到115亿美元。

丹麦优傲机器人有限公司和高工产研机器人研究所联合发布《2017年协作机器人行业发展蓝皮书》指出，2016年全球协作机器人销量1.05万台，同比增长95.35%；市场规模达19.62亿元，同比增长91.44%。该报告预计，到2020年，全球协作机器人销量将达到5万台，市场规模将突破79亿元。其保有量占工业机器人保有量的比值，将从2016年的1.19%上升到5%。优傲总裁Jurgen von Hollen也对界面新闻记者表示，目前全球协作机器人市场的年涨幅为60%-70%，且近五年内都将维持这个增速。相比于工业机器人10%-15%的年增幅，前者的表现惊人。

Loup Ventures预测，到2025年协作机器人将占工业机器人总销量的34%。2016年，协作机器人仅占工业机器人销量的3%。这些机器人体积更小，拥有更多的传感器，如果在运行时有人类或者其他物体靠近，这些特点使得协作机器人可以做出更快、更智能的反应。因此，相比于传统机器人，协作机器人的市场前景将更加广阔！

迫切需要力控保证安全，实现零重力拖动，与人交互等

机器人领域力控的发展趋势

发展趋势2，医疗手术、康复机器人飞速发展

全球医疗机器人的市场价值趋势数据显示，2014年是26亿美金，而到2020年预计会达到76亿美金。

据中国食品药品监督管理局的统计显示，医用机器人手术数量已从2005年的2.5万例跃升到2015年的65万例。

全球医疗机器人市场占有率：
美国：47%
欧洲：24%
亚太地区：14%
其他地区：15%

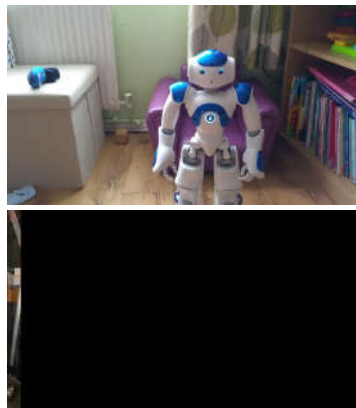
医疗机器人处于快速发展阶段，未来将以更快的速度增长。

机器人领域力控的发展趋势

发展趋势3，腿式机器人迎来发展浪潮

北京师范大学智慧学习研究院发布了《2016全球教育机器人发展白皮书》，据测算测算全球教育机器人市场规模到2021年可达111亿美元（超过600亿人民币）。

腿式机器人在展会、教育、娱乐、陪护、安防等有很大前景。



谢谢大家