

TenonStudio 工业机器人离线仿真编程平台

许中兴

xuzhongxing@iscas.ac.cn

智能软件研究中心
中国科学院软件研究所

2021 年

工业软件概览

- 工业软件大类
 - CAD: 几何设计 (NURBS)
 - EDA: 电路设计
 - 有限元分析: 计算场模拟, 结构强度, 流体, 电磁场
 - 多体动力学: 车辆分析
 - PLM: 产品管理
 - 机械臂离线编程和工厂数字化模拟
 - 大型设备和装备模拟: 油气管道、钻井平台、码头吊车、矿山装备
 - 外科手术模拟
- 代表厂商: 美国与欧洲并存
 - Siemens 德国
 - Dassault Systemes 法国
 - Ansys 美国
 - MSC Software 美国 (被瑞典 Hexagon 集团收购)

视频演示

- 机器人操作演示
- 线缆物理模拟演示
- 工厂演示 (RobotStudio)

概述

- 工业机器人离线编程仿真平台是一类重要的工业软件。它帮助工业机器人用户创建生产线的数字化模型，对工件和生产环境进行几何建模，自动生成或辅助用户生成机械臂的运动程序，对程序进行模拟执行，对工作站中的工具和工件交互进行物理仿真，让生产线的真实运行效果以可视化的方式展现在用户面前，提高生产线的精度和调试效率。
- 在工业 4.0 中，工厂的数字化建模是智能制造的重要组成部分。近年来工业机器人编程软件正在向着这个方向发展。仿真的部分不仅包括机械臂，还包括整条生产线上所有的设备和工件对象。它们是工厂生产线的 digital twin.

数字化工厂模拟软件代表

- ABB RobotStudio
- Simens Tecnomatix
- Visual Components

大国重器

《大国重器》第2季第7集：“智造先锋”里吉利汽车用 Simens 的 Tecnomatix 软件对整个工厂生产线进行了数字化建模，将装配精度提高到比手工调试更高。



TenonStudio 涉及的技术方面

- 工业机器人编程语言及控制器
- 几何建模及机械臂路径生成
- 人机交互：GUI, AR, VR
- 图形渲染
- 多体动力学仿真
- 数字化工厂建模

工业机器人编程语言及控制器

- 工业机器人为了满足各种工业需求，它的编程是相当复杂的，各大厂商均提供了自己的编程语言，如 ABB 的 RAPID。
- 团队自主设计并开发了工业机器人编程语言 Tenon，提供语言编译器及虚拟机执行环境。
- TenonStudio 包含一个自主研发的完整的机器人控制器，包括程序执行，轨迹规划，机械臂逆运动学解算，逆动力学解算等功能。
- 进展：没有实现控制算法，没有对接机器人实体，没有对接电气设备

Tenon 程序例子

```
module testa
const robtarget target_10=[[151.622, 98.1603, 593.998],
    [0.500005, 0, 0.866023, 0], [0, 1,-2,1],
    [9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
const robtarget target_20=[[400,50,594],[0,0,1,0],
    [0,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
const robtarget target_30=[[364,100,594],
    [0,0,0.923879532,0.382683433],
    [0,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

function void main()
    movej(target_10, v10, z10, tool0, wobj=wobj0);
    movec(target_20, target_30, v10, z10, tool0, wobj=wobj0);
end
end
```

机械臂控制器架构



参考文献：

- Klas Nilsson, Application Oriented Programming and Control of Industrial Robots, 1992
- Klas Nilsson, Industrial Robot Programming, 1996
- Klas Nilsson, Integrated architecture for industrial robot programming and control, Robotics and Autonomous Systems 29 (1999) 205-226

机械臂逆运动学算法

自研了

- PUMA 构型的解析解
- 一般构型的基于 Screw Theory 和 Lie Algebra 的数值解

理论与实践

机械臂逆运动学求解的问题可归结为在 $SE(3)$ 上求解一个非线性方程，这里 $SE(3)$ 不是线性空间，是一个 Lie Group。我在做这个问题的过程中经历了 3 个层面。

- 实现了 Modern Robotics 书上的算法，得到了正确结果
- 理解了 Lie Group, Lie Algebra, Screw Theory, 矩阵指数等理论，给出了在 Lie group 上面的 Newton-Raphson 算法的证明（未在公开文献中找到；Newton-Raphson 算法都是在 R^n 上面给出的）
- 在软件的实际运行中发现这种通用的数值解不稳定，在某些特定的点会得到无解的情况。后又推导实现了针对 PUMA 构型的解析解

几何建模及机械臂路径生成

- 工业机器人编程的本质是将物理世界转换为用坐标描述的几何世界，从而能够生成包含精确坐标的运动指令。对各种工件和工具的精确几何 CAD 描述是建立坐标描述的基础。
- CAD 软件的核心是几何内核 (geometric modeling kernel)。目前世界上主要的几何内核均为国外开发 (“卡脖子” 技术之一)，代表作包括 ACIS 和 Parasolid。
- 本系统使用了唯一工业级的开源几何内核 OpenCascade，在其基础上进行深度二次开发，实现对标准 STEP 文件的读写和绘制，几何特征选取，几何数值测量，机构和生产线元素几何建模，几何特征建模等功能，帮助用户建立工作站的精准几何模型。
- 有了模型的几何数据，系统提供高度自动化的路径生成功能，可针对 NURBS 曲线生成近似运动指令。并可交互式调整机械臂工具的方向。
- 在对路径仿真过程中，系统能实时发现不合法路径，路径中的奇异点，不可达点，检测机械臂工具和工件的碰撞。

OpenCascade

- OpenCascade 是目前唯一的工业级开源几何内核，是由法国 Matra 公司在 90 年代初开发，二十多年的时间里版权几经转手，目前属于法国 Areva 集团，主要由俄罗斯一个公司在开发。除了开源的部分，OCC 还有商业的高级功能组件和服务。OCC 是目前最合适的 CAD 的基础，它完善支持 ISO 10303 STEP 标准。
- 目标是吃透这个软件，可以按照自己的需求进行持续的开发。

STEP 标准

- ISO 10303 是一个庞大的标准体系，定义了一整套 CAD 数据交换语言和格式
 - ISO 10303-11 EXPRESS 语言
 - ISO 10303-21 STEP 文件格式
 - ISO 10303-242 Managed model-based 3D engineering 数据类型定义
- 标准需要购买，一些数据类型定义可以参考以下网站
 - <https://www.steptools.com/>
 - <https://ap238.org/>

人机交互

- 使用 Qt 作为 GUI 的框架，使用 Qml/QtQuick 开发界面
- 交互的开发工作量很大
- 未来还会支持 AR, VR
- 目前的开发和运行平台是 Linux (Ubuntu), 对 Windows 的移植没有技术障碍。

图形渲染

- 暂时实现了几个简单的基于物理的 shader (GLSL), 包括金属效果, 非金属效果
- 未来: 真实渲染, machine learning training

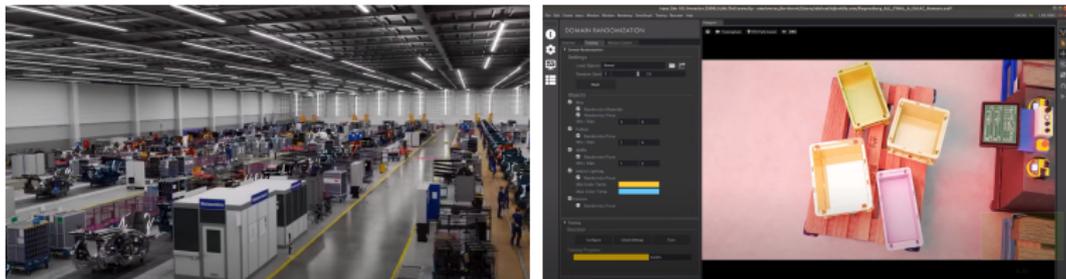


Figure: BMW & NVIDIA Omniverse - Designing, Optimizing and Operating the Factory of the Future

多体动力学模拟

- 模拟机械臂线缆、工件等物理实体之间的互动
- 今年上半年实现了瑞典 Algorix 公司的物理仿真算法 (ABB RobotStudio 使用的物理 SDK)
 - Discrete variational integrator
 - Multifrontal sparse linear solver
- 参考文献: Claude Lacoursiere, Ghosts and machines: regularized variational methods for interactive simulations of multibodies with dry frictional contacts, PhD Thesis, 2007

软件工程师如何做领域开发

- 多体动力学的仿真需要很多知识
 - Lagrange 分析力学
 - DAE 数值解
 - 稀疏线性方程数值解
- 软件工程师能否把这些外包给一个力学专家，然后拿着他的方程写 C++ 代码？
- 软件工程师没有办法外包对知识的掌握，必须、也可以通过阅读书籍和文献学会开发软件需要的领域知识
- 但并不是说软件工程师就需要成为领域专家，上面这些领域每个都深不见底，但是一些主要的理论和方法是稳定的

工业软件的难点

- 很多领域知识是缄默知识，没有书籍和文献可以参考
- 理论只解决主要的问题，用户需求和 corner cases 需要在实践中积累
 - 歼 20 设计过程中的需求全都积累到了法国达索的 CATIA 软件里
 - 工业软件是对行业知识的积累

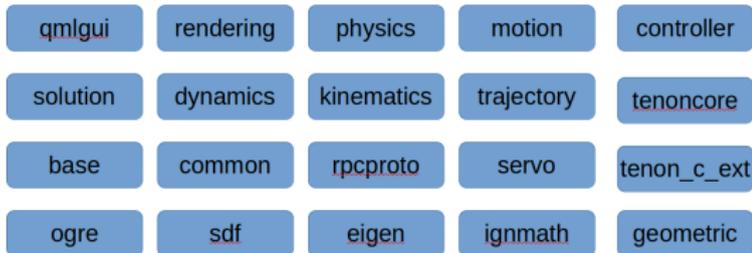
物理部分的 TODO

- 线缆约束的实验
- 碰撞检测
- 非光滑力学方程
- 求解器效率提升，并行化
- 多体系统建模界面

工厂数字化建模

- 自动化设备的运行仿真：PLC, Digital I/O
- PLM
- 作为未来工作

代码架构



- 整个项目规模 500 万行 C++
- 自己写的约 30 万行

开发原则

- 工业软件以自研为主，也积极融合开源成果，但不是简单的拿来主义，国际上多年积累的先进成果先引进后消化。不同的方面有不同的做法。
- OpenCascade 以引进消化为主
- 物理引擎以自研为主
- 机械臂语言模仿已有的成熟语言，自研编译器和执行环境，与机器人公司的用户积极互动（工业软件是用出来的）

工业软件开发需要什么样的人

- 工业软件既是软件，又有工程
- 一个软件工程师 + 一个力学专家 + 一个机械工程师 + 一个计算数学家 = 工业软件开发团队？
- 一个懂力学和数值方法的软件工程师 ✓
- 一个懂大规模 C++ 软件开发的机器人专家 ✓
- 要点：软件、数学和专业必须装在一个人的脑子里，可以有侧重点，但需要掌握要用到的知识，而无法把对知识的掌握“外包”给领域专家

MSC ADAMS 多体动力学仿真软件的开发历史

- 多体系统是由刚体和关节组成的系统，根据牛顿力学建立动力学微分代数方程组，进行数值求解，得到系统的仿真运行轨迹
- 代表商业软件：MSC ADAMS
- 应用：Multibody Simulations of a Martian Rover

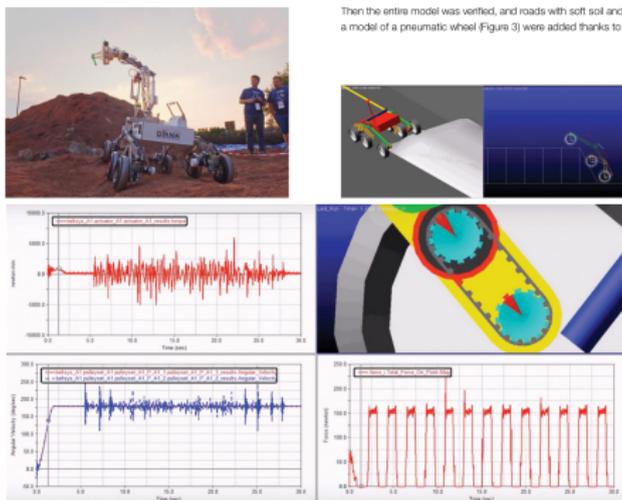


Figure: MSC ADAMS

MSC ADAMS 多体动力学仿真软件的开发历史

- 1952 年法国人 Jacques Denavit 到西北大学读 EE 的研究生 (机器人逆运动学 DH 算法的 D), 但是后来读了 ME 教授 Richard S. Hartenberg 的博士 (DH 算法的 H)
- 1961 年 John J. Uicker 到西北大学, 编写了一个刚体动力学系统
- 密歇根大学研究生 Milton A. Chace(导师是 Joseph Shigley, 机械设计标准教科书的作者) 访问了西北大学, 和 Uicker 成为朋友
- 后来成为维斯康辛大学教授的 Donald F. Livermore 读了 Denavit 的博士, 1965 年毕业
- 1964 年 Chace 博士毕业, 1967 年加入密歇根大学, 他开发了 KAM 系统
- 1967 年 Uicker 加入维斯康辛大学, 和 Livermore 一起, 但是后来 Livermore 英年早逝 (ALS)
- 1967 年印度人 Pradip N. Sheth 到维斯康辛大学读博士, 提出 coordinate partitioning, 后来由 Roger A. Wehage 发扬光大

MSC ADAMS 多体动力学仿真软件的开发历史

- 1968 年 Uicker and Livermore 和工业界联系，和福特汽车公司合作进行研究，后来 Uicker 回学术界之后，由 Structural Dynamics Research Corporation (SDRC) 对 IMP 软件提供服务，这也为后来的版权纷争埋下了伏笔
- 1972 年 Uicker and Sheth 用 FORTRAN IV 开发了多体动力学系统 Integrated Mechanisms Program (IMP)
- 1972 年 Sheth 毕业之后去密歇根的 Chace 教授那里做博士后，开发了 Dynamic Response of Articulated Machinery (DRAM)
- 1972 年密歇根 Chace 的另一个学生 Nicolae Orlandea 正在开发 Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems (ADAMS)
- 1973 年 Chace 和他的学生们成立了 Mechanical Dynamics, Inc. (MDI) 公司对 ADAMS 进行商业化
- Sheth 后来加入了弗吉尼亚大学，2009 年过世
- Orlandea 后来加入了 Deere 农用机械设备公司，直到退休

MSC ADAMS 多体动力学仿真软件的开发历史

- 1980 年夏天 Uicker 到波音公司访问，帮助波音部署 IMP 系统，后来的 747, 757, 767 设计都用上了 IMP
- 1984 年 Uicker 和 SDRC 为 IMP 的版权发生了争执，SDRC 认为 IMP 的源代码属于公司，不让 Uicker 带回学校继续研究，最终双方各拿走一份源代码分道扬镳。但是 SDRC 没有人懂软件的工作原理，而 Uicker 也无力进行商业推广，未能像 ADAMS 一样成功商业化
- ADAMS 后来被 MSC 收购，MSC 最初由 NASA 资助进行结构分析软件 NASTRAN 的开发。后来 MSC 被瑞典的 Hexagon 集团收购。
- 大约这个时候爱荷华大学的 Edward C. Haug 教授开发了 Dynamic Analysis and Design System (DADS)，成立了 CAD Systems Incorporated (CADSI) 公司，后来被 LMS International 收购。巧合的是，CADSI 的首任 CEO 是 SDRC 的高管
- 前面提到的 Roger A. Wehage 是 Haug 的学生，他毕业后留校任教，后来去了卡特皮乐公司（做工程机械的）

要点

- 先发国家优势
 - 工业软件的核心技术最初开发的时候属于学术前沿，利用基础研究经费，由一群教授和博士研发核心模块，成立公司商业化，被更大的厂商收购
 - 在这些技术开始的时候，可以边开发系统边发表论文，工程学术两不误
- 后发国家劣势
 - 学术界认为这些是 solved problem，但实际上这些技术并没有被掌握：学术前沿不等于核心技术所在的方向
 - 工业界要在市场上和别人开发了 30-50 年的软件竞争，用户由于有更好的产品可选而没有耐心与产品共同成长
 - 而且由于这些技术已不再是学术前沿，教授和博士生也不研究这些东西，转而都去研究那些“热门”方向，造成人才匮乏

开发基础设施

- GibLab: git repo, patch review, issue tracking 等
- Slack: 日常开发交流