

5-25-2022

## A Cyber-physical Integrated Modeling Method Oriented for Motion Simulation of Complex Systems

Wenzheng Liu

*Institute of Industrial Intelligence and Systems, Tsinghua University, Beijing 100090, China;* liu-wz19@mails.tsinghua.edu.cn

Heming Zhang

*Institute of Industrial Intelligence and Systems, Tsinghua University, Beijing 100090, China;* hmz@mail.tsinghua.edu.cn

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Invited Papers & Special Columns is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# A Cyber-physical Integrated Modeling Method Oriented for Motion Simulation of Complex Systems

## Abstract

**Abstract:** The traditional virtual modeling of motion simulation lacks the dynamic modeling of cyber subsystems and physical subsystems in complex systems. The advantages of the traditional kinematic virtual modeling and cyber calculation are combined, and aiming at the problem that the accuracy and real-time property of motion simulation cannot meet the actual industrial manufacturing requirements, a *cyber physical integrated modeling method for the motion simulation of complex systems is proposed. The inconsistency between real robotic driving and virtual robot motion is solved, which is verified by a case study of mechanical arm motion control.* A virtuality-reality mapping platform for complex system motion simulation is built, which integrates the modeling environment CoppeliaSim, together with actual robot feedback of motion and mapping model of simulated-actual robot motion, to obtain the unique pose solution of the motion equation. Experimental results show that the proposed method can realize real-time motion simulation of industrial robot.

## Keywords

complex system modeling, motion simulation, cyber-physical integration, robotic arms, kinematic mapping

## Recommended Citation

Wenzheng Liu, Heming Zhang. A Cyber-physical Integrated Modeling Method Oriented for Motion Simulation of Complex Systems[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(5): 954-963.

## 面向复杂系统运动仿真的信息物理融合建模

刘文正, 张和明\*

(清华大学 工业智能与系统研究所, 北京 100090)

**摘要:** 传统运动仿真的虚拟建模缺少针对复杂系统中信息子系统与物理子系统的动态性融合建模。融合传统运动学虚拟建模与信息计算的优势, 针对运动仿真的精度和实时性难以满足实际工业制造需求的问题, 提出面向复杂系统运动仿真的信息物理融合建模方法, 并以机械臂的运动学控制为仿真案例进行验证, 解决了实际环境中机械臂的驱动与仿真环境虚拟机械臂运动不一致的问题。搭建了复杂系统运动仿真虚实映射平台, 集成了虚拟建模环境 CoppeliaSim, 融合实际机器人的运动反馈, 和虚实映射计算模型, 确定工业机器人运动方程的唯一位姿解。实验结果表明本文提出的方法实现了工业机器人的虚实映射实时运动仿真。

**关键词:** 复杂系统建模; 运动仿真; 信息物理集成; 机械臂; 虚实运动映射

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X (2022) 05-0954-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0097

## A Cyber-physical Integrated Modeling Method Oriented for Motion Simulation of Complex Systems

Liu Wenzheng, Zhang Heming\*

(Institute of Industrial Intelligence and Systems, Tsinghua University, Beijing 100090, China)

**Abstract:** The traditional virtual modeling of motion simulation lacks the dynamic modeling of cyber subsystems and physical subsystems in complex systems. The advantages of the traditional kinematic virtual modeling and cyber calculation are combined, and aiming at the problem that the accuracy and real-time property of motion simulation cannot meet the actual industrial manufacturing requirements, a cyber physical integrated modeling method for the motion simulation of complex systems is proposed. The inconsistency between real robotic driving and virtual robot motion is solved, which is verified by a case study of mechanical arm motion control. A virtuality-reality mapping platform for complex system motion simulation is built, which integrates the modeling environment CoppeliaSim, together with actual robot feedback of motion and mapping model of simulated-actual robot motion, to obtain the unique pose solution of the motion equation. Experimental results show that the proposed method can realize real-time motion simulation of industrial robot.

**Keywords:** complex system modeling; motion simulation; cyber-physical integration; robotic arms; kinematic mapping

## 引言

现代工业制造正在向智能制造转型。在这种背

景下, 信息物理系统<sup>[1]</sup> (cyber physical system, CPS) 于 2006 年被提出。该系统将物理资源与计算资源通过通信网络进行有机融合, 并借助 3C (computer,

收稿日期: 2022-02-09 修回日期: 2022-04-14

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1701600)

第一作者: 刘文正(1990-), 女, 博士生, 研究方向为信息物理系统建模。Email: liu-wz19@mails.tsinghua.edu.cn

通讯作者: 张和明(1966-), 男, 博士, 教授, 研究方向为智能制造, 复杂系统建模与虚拟仿真。E-mail: hmz@mail.tsinghua.edu.cn

communication, control) 技术实现智能系统的环境感知、实时计算和动态控制<sup>[2]</sup>。CPS 作为一项复杂的系统工程, 通过引入先进传感器技术、数据融合技术、数字化技术、计算机网络和云计算等技术, 为制造业生产过程、供应链、诊断维护和生产服务等各个方面带来巨大变革<sup>[3-4]</sup>。

这类系统包括物理执行器, 多源感知器, 信息控制模块, 虚拟计算系统, 及通信传输系统。标准的模块化, 交互频繁, 动态自主性等特征, 使 CPS 能进行虚拟计算, 逻辑控制, 并有效地执行具体的作业。对 CPS 进行的建模和仿真能否直接应用到实际应用中, 很大程度上依赖于子系统模型的精确性<sup>[5]</sup>。传统的静态建模技术应用到制造系统, 依赖建模人员的多学科的经验<sup>[6]</sup>, 建模周期长, 导致传统对于制造系统的建模分析困难<sup>[5]</sup>。用于具有高度动态性的信息物理系统时, 非线性系统运行数据呈指数级增长, 将数据驱动的分析方法引入建模系统成为必然趋势<sup>[7]</sup>。因而, 对实际的制造系统应用进行模拟分析时, 需要集成多学科的建模系统, 通过数据驱动的仿真分析<sup>[8]</sup>, 适应信息物理制造系统的大数据特性和动态性。

随着硬件计算处理的进步和智能计算算法的深入, 现代工业中原有的自动系统向信息物理系统进行迭代, 这类系统越来越多的被应用于工业制造中。现代制造中的装配机械臂, 智能车间, 都是工业复杂系统通过信息物理计算进行优化控制的典型应用<sup>[9]</sup>。

信息物理复杂系统的运行是一个多学科协同的过程, 其建模过程涉及各种学科模型的耦合, 需要更灵活智能的控制计算和精准的虚实映射建模。根据信息物理复杂系统的执行逻辑, 将系统模型分解成待集成的子系统模块, 便于模拟子系统的计算特征和交互控制。

模块化的建模思路有利于集成不同学科的专业模型, 使系统模型构建分别由各自的专业人员完成, 间接支持了不同专业领域的知识协同。选择符合仿真需求的子系统模块, 并在仿真过程中, 激活

与其他子系统模块的耦合交互关系, 是实现复杂耦合模型构建的一种直接思路。基于模块化组件构建复杂系统的模型, 重点关注子系统模型的结构特性和组件行为的描述。通过扩展的方式<sup>[1]</sup>定义组件之间的耦合, 在模块化、分层建模中, 通过耦合描述和约束模型组件之间的通信, 保证了多层次模型之间的结构和接口一致性。

模块式建模可支持对现有模型的重用, 在建立模型过程中对已有模型不做修改或稍加改动而对其再利用, 构建新的系统模型。这种建模思路可以降低仿真模型的开发成本、提高建模效率和质量。学者从模型互操作的角度给出了模型重用的步骤、框架和形式化表示<sup>[10-11]</sup>。现代智能云架构下, 学者们研究了基于语义 Web 的模型重用的框架, 模型工程<sup>[12]</sup>, 用元数据的技术来实现模型组件自动重用的模式<sup>[13]</sup>和动态组合方法<sup>[14]</sup>。MSaaS 平台可为基于云架构和智能组合算法的模型重用及仿真服务。现有研究没有给出通用的模型重用实现方式, 多通过各专业模型的对外接口封装为可组合集成的子模型。这些理论基础为扩展复杂全系统的模型和仿真提供了可能。

基于子模型集成的理论集成复杂系统的信息计算模型和实体的虚拟模型, 是分析系统运行状态和特征的有效建模方法<sup>[15]</sup>。本文提出了面向复杂系统实时虚实融合的信息物理全系统集成建模方法。该方法基于子系统模块组合, 通过数据驱动的信息计算模型, 扩展了系统的仿真应用多样性。

## 1 面向复杂全系统仿真的子系统模块化建模

子系统间的反馈等交互间接地反应了子系统的行为特性。全系统建模涉及到已知或未知等不同感知程度的系统模块, 图 1 所示为模型交互的 3 种模式。系统模块 A 对子系统模块 B 发出信号请求, 并不清楚模块 B 给出该信号请求对应的运算原理, 而模块 B 根据请求信号的内容, 会给出服务响应。某些仿真场景中, 系统模块 C 的运行机理不完备,

但可通过专家知识总结其运行规律。因而子系统模块  $A$  向  $C$  可以根据模块  $C$  的知识规则等请求交互。某些子系统模块  $D$ ，其计算机理可被完全感知，因而可直接对  $A$  的信号请求根据自身的映射函数做出相应响应。

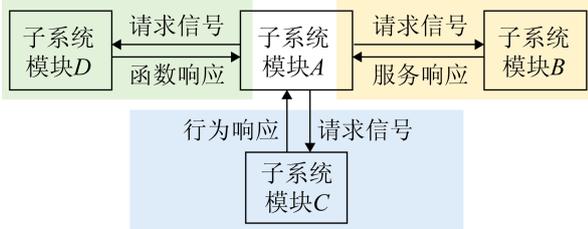


图1 模型交互的3种模式

Fig. 1 Three modes of model interaction

在信息物理全系统仿真环境中，由于学科限制，建模人员难以获知大部分物理模块的真实运行机理。因而或者直接将该物理实体当作黑盒模型，利用其提供的输入输出端口直接向其发送仿真服务指令，或者通过特定的规律观察，数据统计猜测并探索其输入输出之间的函数关系，从明确的数据中学习到的白盒模型去模拟其真实的模型机理。且当物理实体真实的数据量增大时，该白盒逼近模型可通过数据挖掘的技术优化，逐步逼近真实的物理实体模块。当子系统模块部分已知，难以获知全部的模块运行原理时，在现有的已知部分的基础上，根据历史数据或者专家知识构建接近真实机理的灰盒模型对真实的系统模块进行描述。

由于建模人员与多学科之间的专业壁垒，和初步浅层的知识共享，对信息物理系统场景下的描述存在众多感知程度不同的白灰黑盒模型。因而，基于数据驱动的建模可以规避子系统准确同时困难的机理模拟，通过拟合优化等构建子系统的模型。

模型驱动的虚实建模与仿真框架，支持模块化的复杂全系统模型构建。其中子系统模型的构建可重用各自专业软件的学科模型。通过融合或者组合等方式实现信息物理全系统模型的实现。

典型的信息物理全系统运动仿真模型包括信息系统和物理系统2个主要子系统。面向运动仿真

的信息系统包含规划控制，动力学，运动学等子系统，物理系统包含驱动器，执行器，传感反馈设备等。信息系统通过虚实映射计算间接优化并控制物理系统执行作业指令，物理设备通过实虚映射计算间接反馈给信息系统，并完善信息模型。各个子系统模型分别由不同的学科软件进行构建。规划控制等可由各类优化控制算法完成控制逻辑。动力学、运动学模型往往由复杂系统的领域软件实现，如机器人的运动学<sup>[16]</sup>、动力学由 Gazebo、Vrep 等机器人建模仿真软件实现，车辆动力学、运动学由 Carmaker, Carlo 等实现。物理系统由物理设备终端组成。

## 2 集成仿真框架

为了实现复杂系统的多学科模型协同仿真，通用的集成仿真框架技术从被提出到发展成熟。高层体系结构(high level architecture, HLA)为协同的模型建立联邦仿真体系，通过 RTI (run time infrastructure)实现联邦成员的仿真推进。FMI (functional mock-up interface)通过抽象异构模型的交互接口，屏蔽了学科异构模型的实现细节，分散了协同仿真计算的压力。基于这些基础的协同仿真框架，产生了符合现代制造要求的仿真模式。

### 2.1 LVC 仿真

LVC 仿真是指具有实况仿真(L)，虚拟仿真(V)，和构造仿真(C)的仿真。依托于 HLA，模型驱动体系结构等仿真技术实现建模与仿真的互操作性，可重用性和可组合性。

HLA 的技术用于 LVC 仿真，满足异构仿真模型的集成要求；基本对象模型重点实现了 LVC 对于异构模型的标准化封装及重用；试验与训练使能体系结构多用于军事仿真，切合 LVC 的仿真要求；公共训练仪器体系是支撑训练场景中应用广泛的架构技术。这些技术单独发展，同时是 LVC 仿真要求的具体使能技术。异构学科模型通过模型运行组件，发布/订阅组件，消息处理和实时运行组件<sup>[17]</sup>依托于仿真技术实现 LVC 仿真。

## 2.2 硬件在回路仿真

硬件在回路仿真是在电力系统<sup>[18]</sup>, 车辆<sup>[19]</sup>、发动机控制<sup>[20]</sup>等嵌入式控制中应用广泛的实时信息物理协同仿真技术。通过软件仿真与实体硬件的实时融合, 解决了系统整合中软硬件不兼容的问题。

硬件在回路仿真, 克服了仿真场景和现实场景之间的差距和局限性<sup>[21]</sup>的同时, 难以避免由于对物理设施的依赖性导致的时间成本消耗。

## 2.3 软件在回路仿真

软件在回路仿真扩展了物理在回路仿真的思路, 解决了对于物理设施的依赖性。

在这种仿真模式中, 软件虚拟模型之间互相反馈与控制, 并依次优化各自的仿真设计。因而, 该仿真模式可以实现分层的全系统仿真优化<sup>[22]</sup>, 在制造系统中得以广泛应用<sup>[23]</sup>。

## 3 面向复杂系统运动仿真的异构子模型集成建模

图 2 所示为面向运动仿真信息物理集成建模的应用方案, 主要由信息系统和物理系统组成, 其中信息系统包括运动规划子系统, 运动学子系统和动力学子系统。该方案的应用流程为: 规划控制子系统由人机交互接口(human-machine-interface, HMI)接收仿真指令并仿真, 发送控制信号到运动学子系统。该模块求解运动变量并输出关节角给动力学子系统。动力学子系统给出力控信号, 传输给虚拟设备和物理设备执行。

信息系统中的控制子系统、运动子系统和动力子系统通过机理模型或者数据驱动的智能算法实现对物理设备的智能控制, 提高其执行任务的多样性和效率; 物理系统的执行器执行控制指令的同时, 通过反馈模块实时反馈物理设备状态, 减少了信息系统建模的难度和工作量。这种虚实控制和实虚的反馈通过虚实映射环节和基于工业局域网的底层通信来完成。

现有的集成仿真系统为本文的集成建模仿真提供了使能支撑。本文的研究着眼于异构多学科模型的协同仿真, 通过运动规划、运动学虚拟仿真与物理设备的虚实融合, 符合 LVC 仿真与硬件在环仿真的需求, 同时引入数据驱动的运动规划模型, 适应了信息物理动态协同仿真的大数据特点。

### 3.1 异构模型集成适配器

复杂系统的各专业模型通过模型适配器转化为可以进行协同仿真的模型代理。模型适配原理如图 3 所示。

模型代理通用表示为  $M=\{\text{BasicInfo}, \{\text{Ports}\}, \{\text{State}\}, \text{Bahavior}, \text{SimInterface}, \text{Note}\}$  其中 BasicInfo 为模型名称, 路径, 读写权限等基本信息,  $\{\text{Ports}\}$  表示输入, 输出等交互端口,  $\{\text{State}\}$  为子系统模型的属性状态等特征。Bahavior 为系统的执行函数或者具体活动操作等, SimInterface 为子系统模型的采样间隔, 仿真模式, 开始, 暂停, 继续, 停止等仿真接口。

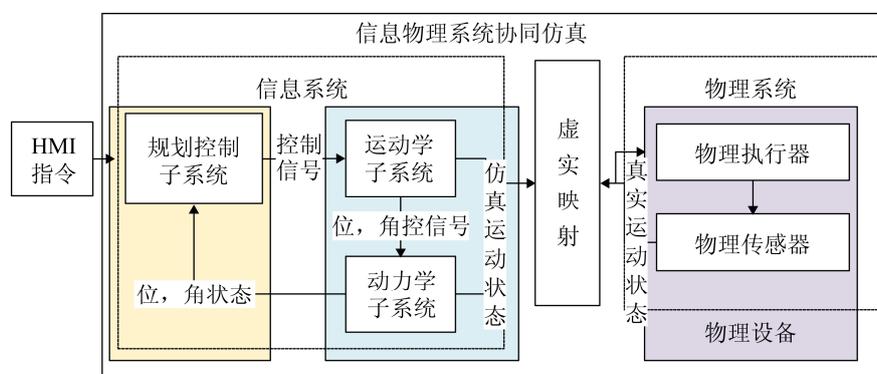


图 2 面向运动仿真信息物理集成建模的应用方案

Fig. 2 Application scheme for integrated cyber-physical modeling for motion simulation

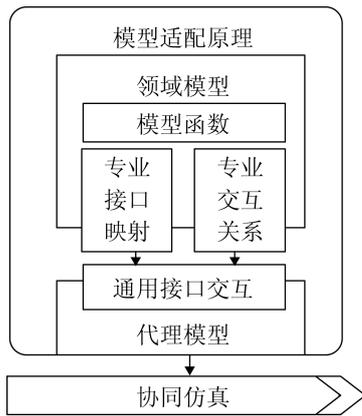


图 3 模型适配原理

Fig. 3 Principle of a model adapter

以典型的信息物理复杂系统机械臂的运动仿真为例，说明复杂系统的信息物理集成方法。

## 3.2 运动学信息物理建模

### 3.2.1 物理实体子系统

复杂系统的物理实体系统是信息物理系统的基础和核心子系统：物理系统是信息计算指令的执行环节；实体设备需要感知设备本身和环境状态，并反馈给信息系统进行分析解算。

通过传统的建模方法对信息物理系统进行建模，要求建模人员 1:1 还原物理系统的全部控制逻辑和运动特征，操作环境等。由于信息物理系统的高度动态不确定性，这将是传统设备建模的指数级资源消耗。信息物理集成建模技术的发展可以利用数据驱动的策略，学习优化虚拟建模，避免传统建模技术中资源的大量耗费。

对物理系统进行简单模拟，通过实时的执行反馈可以实现信息物理系统模型的不断优化。物理实体子系统被简化了内部的执行细节，被当作黑盒模型提取物理特征。

### 3.2.2 信息子系统模型

除了对物理设备的几何结构等进行模拟，信息子系统模型还涉及规划控制等信息计算子模型的耦合。

#### 3.2.2.1 物理系统的虚拟模型

物理系统的虚拟实现模型，多由特定领域的建

模软件实现，如 CoppeliaSim 中集成的多种机械臂等复杂系统的 CAD 模型，实现了机器人的动力学驱动，点路径驱动，关节驱动模型。

各虚拟系统模型包含各自的操作句柄 Handle 和关键控制特征  $(X, Y, Z, RX, RY, RZ, Vel_i, Acc_i)$ 。通过 Handle 明确被控对象，并通过对象的位置向量  $P_i(X, Y, Z)$ ，姿态向量  $O_i(RX, RY, RZ)$ ，对象速度  $Vel_i$  或加速度  $Acc_i$  等运动特征进行编辑，实现对被控对象进行间接控制。

#### 3.2.2.2 虚拟模型的运动规划

特定领域的建模软件往往集成了虚拟对象模型的简单运动规划。然而针对特定场景特征的运动规划计算往往需要更灵活，更有针对性的算法实现。因而，需要将基于外部脚本 Python 等的运动规划模型，和虚拟对象模型进行集成，以实现信息物理系统更多样的信息计算。

根据虚拟设备的当前运动状态及环境信息  $Env(t)$  计算对象的当前位置向量增量  $\Delta P_i(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ ，姿态增量  $\Delta O_i(\Delta RX, \Delta RY, \Delta RZ)$ ，速度增量  $\Delta Vel_i$  是运动规划的核心内容，本质是连续的微分系统。

对物理系统进行虚拟模拟之后，针对特定仿真需求，根据正逆运动学模型解算实体系统的运动特征。该运动特征作为动力学模型的输入，通过动力学计算模型可以获取虚拟实体的动力输入。

#### 3.2.2.3 虚实映射模型

虚实映射模型的目的是，将来自虚拟仿真系统、工控封装的制造实体的状态与关键特征进行映射计算。具体通过算法库中虚实映射算法的支持，给出虚拟仿真端或实体制造设备需要的力控或运动控制参数，从而使虚拟仿真端得以验证模型精度，同时使制造实体在实际作业中实时响应虚实控制。因而虚实映射模型交互端口包括如下两方面。

输入端口：接收信息子模型的控制输入，并做出向实际端输出信号的转换计算；接收物理子模型的反馈输入，进行优化信息子模型的函数计算。

输出端口: 向物理子系统发送转换的控制信号; 向信息子系统发送反馈并转化的实体状态信号。

### 3.3 异构模型集成仿真

运动规划模块, 动力子系统模块和正逆运动学的数值计算模型是物理设备运动的虚拟映射子模型, 是标准的连续微分系统(解析计算模型是标准的连续函数系统)。这些模型的仿真运行时符合连续系统的推进机制。

该系统的仿真过程中与物理实体以及人机接口的交互往往具有动态性, 非线性性, 因而虚实系统的交互事件, 可被建模为连续信息模型的离散事件输入。

各虚拟子模块按照连续推进机制, 在采样时序点计算虚拟实体的运动特征, 并控制物理设备按照规划运动; 实体的物理设备实时记录各自的运动状态, 并通过传感反馈给连续的虚拟子系统。物理设备故障或离线, 上线运行等离散事件构成虚实融合仿真的离散信号, 并将连续的子系统仿真分割成各连续片段。通过这种实时的控制与反馈机制实现虚实融合的仿真推进。图 4 所示为虚-实实时混合仿真推进, 以简化的故障和运行 2 种状态为例说明此实时推进机制, 连续片段的推进采取等步长推进算法。

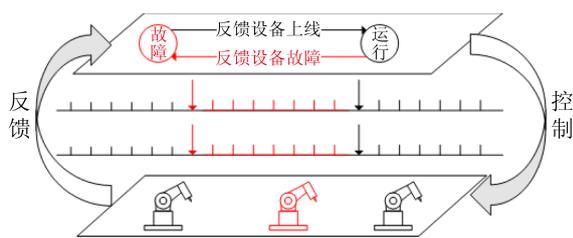


图 4 虚-实实时混合仿真推进  
Fig. 4 Real-time hybrid simulation advancing

因而该虚实集成系统的仿真运行是被离散事件间隔的连续推进的组合, 符合离散连续混合仿真机制。

## 4 信息物理集成建模实例

工业机械臂是典型的复杂信息物理系统, 因

其在航空、航天、船舶等重要产业中应用广泛, 其控制技术是发展智能工业与智能制造重要的支撑技术。

以 Kuka 机械臂为例, 说明对六自由度机械臂基于虚拟集成建模, 以有效控制虚实机械臂同步运动的方法, 详细阐述信息物理集成建模方法。

第 1 步: 在虚拟仿真环境中搭建机械臂结构模型, 运动控制模型, 及操作环境模型;

第 2 步: 根据实体和虚拟机器人的实时运动状态及环境, 获取虚实控制系统规划的机械臂的运动路径;

第 3 步: 根据实体机器人与虚拟机器人的虚实映射计算, 获取虚实机械臂实体的运动指令。实虚映射是通过实体机器人, 排除虚拟运动指令的多解; 虚实映射是通过虚拟机器人, 排除真实运动指令的多解;

第 4 步: 逐步推进系统仿真, 分别通过网络链路控制虚拟仿真系统中的机械臂和实体机械臂做出响应。

在虚拟机器人和实体机器人的运动过程中, 反馈实体与虚拟机器人的实时运动状态。重复第 2~4 步。

以下详细展开虚实映射仿真的过程。

### 4.1 机械臂实体虚拟模型

为了实现该系统在路径跟踪任务中的仿真, 需要对机械臂实体进行模拟。CoppeliaSim 等机器人仿真环境实现了多种机器人如 UR 系列, Kuka 系列的机器人的虚拟建模。在该仿真平台环境中对机器人的运动控制进行仿真, 需要建立机器人静态的刚体模型、运动学模型并转化为实际环境中机器人运动所需的指令。CoppeliaSim 等机器人虚拟仿真环境可以集成 Solidwork 等制图软件绘制的机械臂静态模型(urdf 文件)。在静态机械臂模型中, 引入机械臂各关节旋转仿真电机, 以模拟实际机械臂的关节旋转, 从而实现对实际机械臂的运动模拟。

Kuka 机器人虚拟机器人模型为

$$M_{sim\_rob} = \left\{ \begin{array}{l} HID_{rob}, \{In_{rob}, Out_{rob}\}, \{S_{rob}\}, \\ B_{rob}, Sim_{rob}, Note \end{array} \right\} \quad (1)$$

式中:  $HID_{rob}$  为该模型的操作句柄表示该模型唯一标识。

$In_{rob}$  为该机器人模型的输入端口, 接收外部交互信息, 在 Kuka 机器人的跟踪循迹中, 多为虚拟机械臂的目标运动状态  $S_{tar}$ , 包含目标位姿 ( $X_{tar}, Y_{tar}, Z_{tar}, RX_{tar}, RY_{tar}, RZ_{tar}$ ) 和目标运动速度  $V_{tar}$ , 加速度  $Acc_{tar}$  由此端口输入。

$Out_{rob}$  为该机器人模型的输出端口, 给出该虚拟机器人的当前状态  $S_{rob}$ ,  $S_{rob}$  包含虚拟机器人当前运动状态 ( $X_{cur}, Y_{cur}, Z_{cur}, RX_{cur}, RY_{cur}, RZ_{cur}, V_{cur}, Acc_{cur}$ ) 及 6 个关节旋转角信息 ( $J_{cur,1}, J_{cur,2}, J_{cur,3}, J_{cur,4}, J_{cur,5}, J_{cur,6}$ )。

$B_{rob}$  为该机器人的内部行为, 对输入端口  $In_{rob}$  接收的交互信号进行解析, 并对状态变量  $S_{rob}$  处理, 提供给输出端口  $Out_{rob}$ 。 $B_{rob}$  调用 CoppeliaSim 运动学工具, 包含根据前向运动学求解 ( $X_{cur}, Y_{cur}, Z_{cur}, RX_{cur}, RY_{cur}, RZ_{cur}, V_{cur}, Acc_{cur}$ ), 根据逆向运动学工具反解其各关节的目标转角 ( $J_{cur,1}, J_{cur,2}, J_{cur,3}, J_{cur,4}, J_{cur,5}, J_{cur,6}$ )。

$Sim_{rob}$  为该虚拟机器人模型的仿真信息设置, 如仿真步长, 仿真求解器等。

由 CoppeliaSim 内部实现, 在此不进行展开。

$Note$  为仿真运行的其他解释性说明。以下子系统模型该字段含义相同, 不重复说明。

## 4.2 运动规划控制模型

为了规划机械臂的末端路径可应用于实际机器人的运动控制, 在 CoppeliaSim 搭建的仿真系统中模仿实际机器人的操作环境, 将摄像头放置于机器人末端, 仿真系统中获得的图像数据传入虚实计算系统, 调用 OpenCV 图像工具包提取图像中人的位置特征, 基于 Tracking 算法计算机器末端的运动路径。规划的路径可传入虚拟仿真环境, 驱动机械臂运动, 实现图像中人物的跟踪。运动规划控制模型由外部 Python 脚本实现, 如式(2)所示:

$$M_{motion} = \left\{ \begin{array}{l} ID_{motion}, \{In_{motion}, Out_{motion}\}, \\ \{S_{motion}\}, B_{motion}, Sim_{motion}, Note \end{array} \right\} \quad (2)$$

式中:  $M_{motion}$  表示该运动控制模型。 $ID_{motion}$  为该模型的唯一标识;  $In_{motion}$  为该运动规划控制模型的输入端口, 接收外部交互信息, 在 Kuka 机器人的跟踪循迹中, 摄像头拍摄图片, 以及虚拟机械臂的当前状态为该模型的输入信息;  $Out_{motion}$  为该运动规划控制模型的输出端口, 给出该虚拟机器人的目标运动状态  $S_{tar}$ ,  $S_{tar}$  包含虚拟机器人目标运动状态目标位姿 ( $X_{tar}, Y_{tar}, Z_{tar}, RX_{tar}, RY_{tar}, RZ_{tar}$ ) 和目标运动速度  $V_{tar}$ , 加速度  $Acc_{tar}$ ;  $B_{motion}$  为该运动规划控制模型的内部行为, 对输入端口  $In_{motion}$  接收的图像利用 OpenCV 提取人物特征, 并计算机械臂的目标运动状态  $S_{tar}$ , 以提供给输出端口  $Out_{motion}$ ;  $Sim_{motion}$  为该运动规划控制模型的仿真信息设置, 如仿真步长, 仿真求解器等, 由 Python 脚本实现, 由 CoppeliaSim 内机械臂的仿真触发, 是事件驱动模式。

运动规划控制模型将机械臂的目标状态  $S_{tar}$  输出给 CoppeliaSim 内的机械臂模型, 通过机械臂的指令系统形成动作指令, 以完成对机械臂的运动控制, 确定其具体作业轨迹。

## 4.3 虚实映射模型

虚拟的机器人运动控制顺序和实际机器人之间存在坐标系旋转顺序不一致问题, 六关节机械臂反解多解问题, 使得机械臂同一末端位姿对应多组关节角解。因而引入虚实映射计算模型如式(3)所示, 实现实际机械臂运动的有效控制, 该模型由外部 Python 脚本实现。虚实机械臂运动映射模型为

$$M_{mapping} = \left\{ \begin{array}{l} ID_{mapping}, \{In_{mapping}, Out_{mapping}\}, \\ \{S_{mapping}\}, B_{mapping}, Sim_{mapping}, Note \end{array} \right\} \quad (3)$$

式中:  $ID_{mapping}$  为该模型的唯一标识;  $In_{mapping}$  为该映射模型的输入端口, 接收外部交互信息。在 Kuka 机器人的运动中, 接收实际机器人  $M_{real\_rob}$  的运动状态反馈  $S_{real}$ , 包含实际运动位姿及实际位姿运动顺序, 并由内部实虚映射计算虚拟机器人  $M_{sim\_rob}$

的  $S_{sim}$ , 或者接收虚拟机器人  $M_{sim\_rob}$  的运动状态反馈  $S_{sim}$ , 包含虚拟运动位姿及虚拟位姿运动顺序并由内部虚实映射计算实际机器人  $M_{real\_rob}$  的  $S_{real}$ ;  $Out_{mapping}$  为映射模型的输出端口, 给出虚拟机器人的目标运动状态  $S_{sim}$  或者实际机器人的目标  $S_{real}$ ;  $B_{mapping}$  为该映射模型的内部行为, 对输入端口  $In_{mapping}$  接收  $S_{sim}$  的或者  $S_{real}$  分别进行映射计算。实际环境中 Kuka 接收到旋转指令  $\{X, Y, Z, RX, RY, RZ\}$  指的是使机械臂末端按照平移向量  $P\{X, Y, Z\}$  移动, 随后依次绕末端坐标系中  $X, Y, Z$  轴按照  $\{RX, RY, RZ\}$  的顺序旋转。而虚拟仿真中的机械臂接收到  $\{X, Y, Z, RX, RY, RZ\}$  指的是虚拟机械臂末端按照平移向量  $P\{X, Y, Z\}$  移动, 随后依次绕虚拟末端坐标系中  $Z, Y, X$  轴按照  $\{RZ, RY, RX\}$  的顺序旋转。因而同样的运动指令使得虚实机械臂末端分别得到不同的位姿。因而需要建模人员按照 DH 模型基于欧拉变换矩阵理论解析与实际机械臂按照指令  $\{X, Y, Z, RX, RY, RZ\}$  运动位姿一致的虚拟机械臂指令  $\{X', Y', Z', RX', RY', RZ'\}$ 。由于机械臂的关节平行等冗余导致求解结果的多解性。基于欧拉变换矩阵理论解析出的多组解使得机械臂处于不同的关节配置。图 5 所示为运动学映射反解碰撞位姿, 这些解的位姿配置有的会和环境发生干涉碰撞, 因而建模人员需要过滤掉会导致机械臂与外部发生干涉碰撞的解。

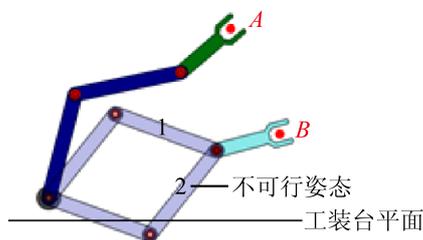


图 5 运动学映射反解碰撞位姿  
Fig. 5 Pose at collision of IK

$Sim_{mapping}$  为该映射模型的仿真信息设置, 如仿真步长, 仿真求解器等, 由 Python 脚本实现, 由 CoppeliaSim 内虚拟机械臂的仿真或者实际机器人

的反馈或者控制请求触发, 是事件驱动模式。

面向虚实映射的仿真, 将虚实实体模型, 运动控制模型, 虚实映射求解算法模型进行解耦, 能实现复杂系统的虚实映射建模与仿真。

另外机械臂的运动路径应具有时序连贯性。设置采样信息窗口长度为 2, 实时采集机械臂的关节转角, 保存当前时刻与前一时刻的采样信息, 过滤多个反解结果中与前一时刻采样关节转角欧式误差最小的一组解。以此为机械臂多解控制条件, 确定工业机器人运动方程唯一位姿解, 实现了工业机器人的信息物理集成运动学仿真模型。

#### 4.4 集成虚实仿真平台

本节通过虚实映射仿真平台, 集成了实体工业机器人 KUKA, 运动学模型, 路径规划模型及虚实机器人的映射模型, 并给出机械臂虚实融合运动的仿真结果。为了有效集成虚拟仿真系统, 虚实映射控制系统, 工控系统和现场实体设备, 基于 Python 搭建子模型集成平台。基于 Jason 轻量化脚本文件, 与 Socket 通讯在各子系统之间传输控制指令或运动特征。该平台集成了 Pytorch 等工具、路径规划、虚实映射控制等算法。

图 6 所示虚实映射平台集成了 CoppeliaSim 提供的仿真环境, 对 Kuka 机械臂的工作环境进行建模。通过该平台的 Python 接口, 连接外部 Python 脚本。通过视觉传感, 提取人物的运动特征, 基于 OpenCV 工具包, 提取图像中人物的运动特征。基于 Tracking 算法, 对机械臂末端的路径进行规划计算。基于欧拉变换算法, 计算虚实机械臂的位姿配置, 得到多组解。通过窗口采样信息过滤得到机械臂有效位姿, 并驱动虚实机械臂运动。采样虚拟机器人和实际机器人的关节输入及位姿, 画出轨迹图, 如图 7 所示。

图 7 中, 蓝色和红色轨迹分别是实际的 Kuka1, Kuka2 的轨迹, 绿色和黑色轨迹分别是虚拟的 Kuka1, Kuka2 的轨迹。可以看出, 本虚实融合仿真的虚实机械臂轨迹一致。由放大的轨迹片段可以

看出,虚实轨迹保持一致性的同时,仍具有一定的偏差,这是由于不可避免的网络链路时延,机械臂末端偏移等原因造成的,在合理范围内。

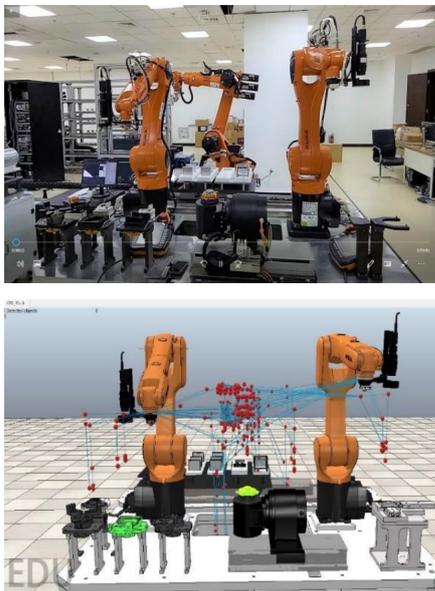


图6 虚实映射平台

Fig. 6 Mapping of virtual and real Kuka

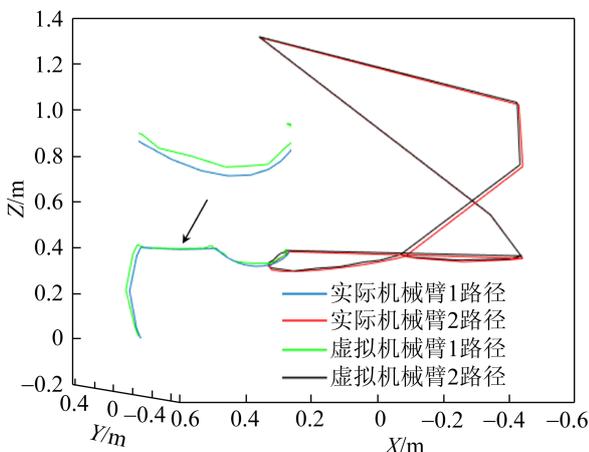


图7 虚实运动轨迹

Fig. 7 Trajectory of virtual and real Kuka

该平台包括对虚实模型,算法模型的解耦管理,因而可以重用子系统模型,扩展仿真场景。平台将底层设备通过即插即用的工控系统集成并控制,可在后续工作中集成多样的底层设备,扩展制造应用,且实现了对运动状态、运动控制精度等的可视化分析,便于机械臂工作产线,机械臂实体的工艺和算法等的优化。

## 5 结束语

本文提出面向复杂系统实时虚实融合的信息物理集成建模方法。并以机械臂的运动学控制为仿真验证案例,在以下方面做出了创新性地探索。

(1) 通过模块化的建模思路,集成虚拟系统模型、运动控制模型、实际实体模型和虚实映射模型;

(2) 借助异构模型适配器,屏蔽了子系统模型的内部实现细节,关注交互信息和离散连续混合仿真机制,实现了信息物理全系统的协同仿真;

(3) 通过虚实映射计算模型,融合了传统虚拟建模和信息计算的优势,实现了专业建软件模型的重用,并降低了传统建模的成本,解决了虚拟模型和物理系统运行不一致的问题。

## 参考文献:

- [1] 张霖,周龙飞. 制造中的建模仿真技术[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(6): 1997-2012.  
Zhang Lin, Zhou Longfei. Modeling & Simulation Technology in Manufacturing[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(6): 1997-2012.
- [2] 李洪阳,魏慕恒,黄洁,等. 信息物理系统技术综述[J]. 自动化学报, 2019, 45(1): 37-50.  
Li Hongyang, Wei Muheng, Huang Jie, et al. Survey on Cyber-physical Systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(1): 37-50.
- [3] 孙子文,张炎棋. 工业信息物理系统的攻击建模研究[J]. 控制与决策, 2019, 34(11): 2323-2329.  
Sun Ziwen, Zhang Yanqi. Research on Attack Modeling of Industrial Cyber Physical Systems[J]. Control and Decision, 2019, 34(11): 2323-2329.
- [4] 李田,苏盛,杨洪明,等. 电力信息物理系统的攻击行为与安全防护[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(22): 162-167.  
Li Tian, Su Sheng, Yang Hongming, et al. Attacks and Cyber Security Defense in Cyber-Physical Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(22): 162-167.
- [5] 刘思峰,方志耕,朱建军,等. 系统建模与仿真[M]. 北京: 科学出版社, 2012.  
Liu Sifeng, Fang Zhigeng, Zhu Jianjun, et al. System Modeling and Simulation[M]. Beijing: Science press, 2012.
- [6] 王长伟. 生产线快速建模与仿真系统关键技术研究

- [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.  
Wang Changwei. Research on Key Technology of Production line Rapid Modeling and Simulation System[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [7] 张冰, 李欣, 万欣欣. 从数字孪生到数字工程建模仿真迈入新时代[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(3): 369-376.  
Zhang Bing, Li Xin, Wan Xinxin. From Digital Twin to Digital Engineering Modeling and Simulation Entering a New Era[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(3): 369-376.
- [8] 杨帆, 刘彦, 李仁发, 等. 一种基于数据驱动的 CPS 建模方法研究[J]. 计算机学报, 2016, 39(5): 961-972.  
Yang Fan, Liu Yan, Li Renfa, et al. A Modeling Method Research Based on Data in Cyber-Physical System[J]. Chinese Journal of Computers, 2016, 39(5): 961-972.
- [9] 张磊, 孙会来. 基于无模型自适应控制算法的机械臂轨迹跟踪控制[J]. 天津科技, 2021, 48(4): 30-34.  
Zhang Lei, Sun Huilai. Trajectory Tracking Control of Manipulator Based on MFAC[J]. Tianjin Science & Technology, 2021, 48(4): 30-34.
- [10] Yilmaz L. On the Need for Contextualized Introspective Models to Improve Reuse and Composability of Defense Simulations[J]. The Journal of Defense Modeling and Simulation, 2004, 1(3): 141-151.
- [11] 王维平, 周东祥, 李群, 等. 基于 MDA 的多层次框架式组合建模仿真方法研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(19): 4358-4362.  
Wang Weiping, Zhou Dongxiang, Li Qun, et al. Multi-Level Framework for Composable Simulation Based on MDA[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(19): 4358-4362.
- [12] Zeigler B P, Zhang L. Service-Oriented Model Engineering and Simulation for System of Systems Engineering[M]. Berlin: Springer International Publishing, 2015: 19-44.
- [13] Fujimoto R M. Research Challenges in Parallel and Distributed Simulation[J]. ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS), 2016, 26(4): 1-29.
- [14] 熊嵩. 大型仿真模型体系的可重用性实现方法研究[J]. 现代导航, 2016, 7(2): 131-136.  
Xiong Song. Reusability Implementation Method of Large-Scale Simulation Model Architecture[J]. Modern Navigation, 2016, 7(2): 131-136.
- [15] 李潭, 李伯虎, 柴旭东, 等. 复杂产品多学科虚拟样机元建模框架[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(6): 1178-1186.  
Li Tian, Li Bohu, Chai Xudong, et al. Meta Modeling Framework for Complex Product Multidiscipline Virtual Prototyping[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(6): 1178-1186.
- [16] Guo F, Cai H, Ceccarelli M, et al. Enhanced DH: An Improved Convention for Establishing a Robot Link Coordinate System Fixed on the Joint[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2020, 47(2): 197-205.
- [17] 杜楠, 谭亚新. 面向 SaaS 的 LVC 仿真试验中间件设计研究[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(6): 1268-1276.  
Du Nan, Tan Yaxin. Design of LVC Simulation Test Middleware for SaaS[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(6): 1268-1276.
- [18] 郭希铮, 游小杰, 徐从谦, 等. 大功率电力牵引控制系统硬件在回路实时仿真[J]. 电工技术学报, 2014, 27(4): 65-70.  
Guo Xizheng, You Xiaojie, Xu Congqian, et al. Simulation of Hardware in Loop for High-Power Electrical Traction System[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2012, 27(4): 65-70.
- [19] 傅成骏. 轨道交通车辆交流传动系统硬件在回路仿真技术进展[J]. 机车电传动, 2009, 3: 1-4.  
Fu Chengjun. Development of Hardware-in-Loop Simulation Technology for AC Drive Systems in Rail Vehicles[J]. Electric Drive for Locomotives, 2009, 3: 1-4.
- [20] 吕升, 郭迎清, 孙浩. 航空发动机故障诊断装置硬件在环实时仿真平台[J]. 航空发动机, 2017, 43(3): 43-49.  
Lü Sheng, Guo Yingqing, Sun Hao. Hardware-in-Loop Real-time Simulation Platform of Fault Diagnosis Device[J]. Aeroengine, 2017, 43(3): 43-49.
- [21] 姚栋伟, 吴锋, 杨志家. 基于双伺服电机的电动助力转向器硬件在环仿真试验平台[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(10): 1931-1934.  
Yao Dongwei, Wu Feng, Yang Zhijia. Hardware-in-Loop Simulation Test Platform of Electric Power Steering System Using Two Servo Motors[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2009, 43(10): 1931-1934.
- [22] Jeong S, Kwak Y, Lee W J. Software-in-the-Loop Simulation for Early-Stage Testing of Autosar Software Component[C]// 2016 Eighth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN). Vienna, Austria: IEEE, 2016: 59-63.
- [23] Ayed M B, Zouari L, Abid M. Software in the Loop Simulation for Robot Manipulators[J]. Engineering, Technology & Applied Science Research, 2017, 7(5): 2017-2021.