

计算制造*

丁 汉

上海交通大学机械学院, 上海 200030

熊有伦

华中科技大学机械学院, 武汉 430074

摘要 提出计算制造(Computational Manufacturing)中的3个典型问题: 调度、排样与对策, 并探索计算制造的理论基础和体系. 计算制造旨在集成计算几何、加工原理、传感器信息融合、网络控制和维护、计算智能和虚拟原型等方法, 目的是使制造系统中的某些问题归结为计算机可形式化描述的计算模型, 研究其可计算性和复杂性, 解决制造过程中出现的几何和特征建模、推理、基于网络的设计、控制和维护、计算智能和虚拟原型有关的数学建模及其复杂性分析.

关键词 计算制造 几何推理 计算智能 基于网络的控制和维护 虚拟原型

在以计算机为核心工具的信息时代, 随着网络化和智能化的不断发展, 制造系统和制造过程的计算复杂性已成为制约产品快速设计和快速制造的关键问题. 计算制造通过对制造系统和制造过程进行建模, 定性推理和定量分析, 解决复杂零件测量、评定、加工路径生成、干涉检查、空间布置、装配规划、可拆卸等问题, 以实现制造系统的重构和调度, 从而达到提高产品质量, 减少成本, 缩短产品开发周期的目的. 作为新兴的研究领域, 计算制造及其相关关键技术的研究已引起了国内外学者的广泛注意. Lee 以复杂曲面的五轴加工为研究对象, 在计算制造的曲面设计和加工方法方面进行了颇有成效的研究^[1]. 国内有关高校在国家自然科学基金的支持下, 对计算制造的关键技术进行了深入研究, 并取得了阶段性成果^[2-4].

1 计算制造

计算制造旨在集成计算几何、加工原理、传感器信息融合、网络控制和维护以及计算智能等方法, 利用计算机对制造过程和制造系统的表示、计算、推理和形式处理, 包括制造中的几何表示、计算、优化和推理, 解决制造过程中出现的几何和特征建模、推理、控制、规划、调度和管理有关的计算问题及其复杂性分析. 目的是使制造系统中的某

些问题归结为计算机可形式化的计算模型, 研究其可计算性和复杂性.

计算制造中的3个典型问题: (1) 调度: 组合爆炸, 求解速度和求解质量, 问题规模和新型启发式算法; (2) 排样: 几何表示, 几何推理, 几何问题求解, 例如背包问题、机器人无碰路径规划问题; (3) 对策: 分布式控制与自主决策, 多主体体的合作与竞争.

计算几何是计算制造的理论基础之一, 与代数几何、组合几何、凸分析、优化和计算方法等学科有关, 并与计算机科学与技术有紧密的联系. 算法分析、数据结构、复杂性分析等都是计算几何实现的基础. 计算几何已成为解决制造系统中诸多难题的有力工具, 如计算几何技术可用来预处理加工零件的几何信息, 从复杂表面设计中提取几何约束的加工信息, 以支持工艺规划活动. 计算机几何的理论框架包括几何模型、计算机表示与空间推理的理论与方法等.

计算智能是计算制造的另一个重要的研究内容. 计算智能是基于数值计算的智能方法, 主要包括进化计算、神经网络与模糊系统等, 其灵活性、通用性及严密性明显优于基于知识的人工智能技术. 计算智能对提高制造系统和制造单元的智能化水平有着重大的意义.

2001-09-27 收稿, 2001-12-12 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 59985004 和 59990470)

E-mail: hding@mail.sjtu.edu.cn

计算制造的研究大体可由定量计算、定性推理和信息融合3部分组成,如图1所示,着重研究制造过程中产品快速建模的计算方法和推理机制,以及产品虚拟原型的建立。

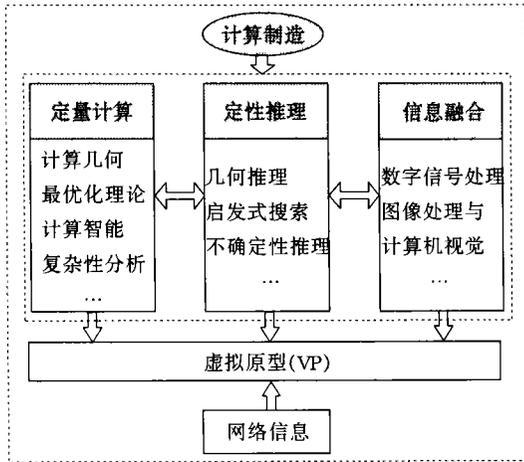


图1 计算制造的有关研究内容

计算制造领域的研究已经涉及制造系统的整个过程和各个层面,涉及多个学科和广泛的研究领域,面向几何推理(即排样问题)可归纳为:

(1) 产品开发设计的形式化描述,定量计算和定性推理.包括正向设计如基于QFD的产品方案设计、布局设计和概念设计的形式化描述,逆向设计如面向实物样件的机理反求工程、带有随机误差的测量数据处理方法、基于光顺样条方法和神经网络技术的曲线、曲面拟合曲面重构理论、残缺数据修复技术等。

(2) 产品开发的全方位预报和预演.在建立真实物理制造系统之前,采用计算机仿真与虚拟现实技术,在计算机和网络支持下,评估有关设计、结构、装配和操作等活动的有效性和合理性.利用面向设计、装配、生产的产品数字模型的映射方法,开发集成化刀位轨迹检查、NC代码验证、碰撞干涉检验系统.例如,文献[2]探讨了可视锥在模具分型、复杂曲面加工和CMM测量规划等制造过程中的应用和实现,从计算制造的角度为制造过程中这一类可接近性分析问题的解决提供了一个新的思路和方法。

(3) 产品性能和制造过程的优化理论和实现方法.根据以上评估有效地减少以至消除真实物理制造系统因设计错误或工艺规划不当而引起的设计返工或产品报废,并在此基础上寻找最优设计方案、

最优工艺方法和最佳工艺流程.例如,为了有效地实现机器人柔性路径规划,在gauge函数的基础上文献[3,4]提出了一种用于三维有界闭凸多面体集间相交、边界接触和非接触检测的数值指标,并成功地应用于中间位姿的生成及假设路径的无碰撞约束检验。

由于计算制造涉及的范围很广,可以针对一些典型的制造活动进行几何推理的研究,例如复杂曲面的可制造性分析,柔性夹具的定性和定量分析,模具的几何可注塑性分析,三坐标测量机的路径规划,装配和可拆卸顺序规划,以及逆向工程的模型重构等.从计算制造的角度对这些问题的深入研究,可提高制造研究的科学水平,推动制造科学的发展。

2 关键科学问题

(1) 制造系统中面向测量(measuring)、建模(modeling)、操作(manipulating)和加工(manufacturing)(4M系统)一体化的基础理论和分析方法,产品的几何可制造性分析。

(2) 建立制造活动不同层次的抽象模型和计算方法、推理信息集成模型和制造过程计算模型不同层次的几何推理方法。

(3) 通过对制造活动的形式化描述,建立起制造系统形位空间(configuration space, C空间)和旋量空间几何推理的理论基础。

(4) 制造系统的不确定性,冲突(trade-off)和计算复杂性问题。

(5) 网络建模理论、方法以及系统结构和功能模型的研究,以及基于网络的控制和维护的理论基础。

(6) 面向工业应用的快速设计、分析和制造的虚拟环境和虚拟原型的建立。

(7) 基于多传感器的信息融合、智能处理算法和决策理论。

2.1 C空间和旋量空间

近几年来,C空间作为机器人运动规划、NC机床刀具轨迹规划和三坐标测量机(CMM)测头路径规划的重要描述方法,对于计算机器人学和计算制造等学科的发展起着重要作用.C空间是描述机器人、加工工具和测量头等刚体位姿(位置和姿态)的一种抽象数学结构.通常我们把固结在刚体上的坐标系相对于某一参考系的位姿代表刚体的一种形位,而把所有形位的总体称为形位空间,简称C-空

间. 在 C-空间中, 机器人、刀具或测头等刚体被映射为一个点, 因而将机器人、刀具、测头等刚体的运动规划问题转化为其在 C-空间中点的运动规划问题. Choi 等^[5]提出了三轴复杂曲面加工的 C 空间方法, 通过将描述设计表面和待加工表面的几何数据映射成为 C 空间的元素, 则刀具轨迹可以在 C 空间中形成. Morishige 等^[6]提出了两类 C 空间方法用于复杂曲面的五轴加工, 在两维 C 空间和三维 C 空间中, 两维 C 空间建立所有刀具姿态和发生碰撞间的关系, 三维 C 空间可以使操作者反映他们的加工决策, 例如刀具的碰撞避免, 平滑刀具轨迹, 以及加工状态等. 但在有效地应用 C 空间方法时有一些挑战性的问题需要解决, 它们是: (1) 多轴加工的 C 空间方法的数学基础; (2) C 空间方法的基本性质; (3) C 空间元素的离散表示方法; (4) 有效的映射和执行算法.

旋量空间作为 C-空间的切空间, 在机构学、机器人学、CAD 和曲面重构、飞行体的控制等领域得到了广泛应用. 文献 [7] 在旋量空间中引入正线性组合、仿射组合和凸组合等概念, 在两对偶的旋量空间中分别定义约束锥和自由锥, 建立点接触约束的几何描述理论, 提出在点接触作用下刚体的单向自由度和单向约束度, 用以描述刚体在点接触约束下的瞬时运动和受力状态, 定义评定机器人抓取和夹具的定性指标, 实现点接触约束相对形封闭的综合方法. 在对形封闭抓取和力封闭抓取系统深入研究的基础上, 文献 [8] 提出了一个定量评价力封闭抓取稳定性的指标, 并证明了该指标在线性坐标变换下及力矩原点改变时, 具有不变性; 在长度量纲改变时, 具有相似不变性. 所提出的指标形式简洁、物理意义明确、易于应用, 为机器人多指手接触点布局规划和夹具规划提供了有效的方法.

在实际的制造系统中, 如何有效地集成和交换在形位空间和旋量空间的操作推理信息, 以实现自由运动规划和约束运动规划, 将是一个具有挑战性的研究课题(图 2).

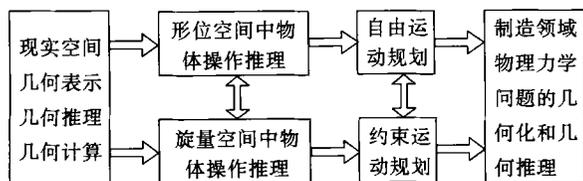


图 2 形位空间和旋量空间的操作推理

2.2 几何建模和推理

在考虑制造过程的约束情况下, 产品的表示和建模是产品设计的一个重要环节, 目前大多由设计者来定义产品的几何模型, 将来随着计算制造的深入研究, 产品的设计有可能类似于超大规模集成电路(VLSI)的设计步骤, 在一个较高层次的功能级的水平上定义产品模型, 几何建模和推理可以通过硅编译器的模拟电路的运算来实现. 现在距离这个阶段还很远, 主要的障碍是缺少考虑加工过程约束的实用模型以及计算和推理的有效方法. 根据不同的制造过程, 提供一个统一的几何推理和建模理论将变得十分重要.

作为计算制造的使能技术之一, 几何推理广泛应用于产品设计、智能机器人、数控加工、自动装配和精密测量等领域. 应用中会碰到各种各样的几何问题, 需要寻求一种有效的拓扑几何学的表示方法, 并进一步提出相应的几何推理方法, 对这些表示进行操作, 最后在实际问题中考核这种几何表示和几何推理方法的优劣. 例如, 在机器人领域, 几何推理是机器人科学向前发展所面临的重大难题之一. 它是机器人装配推理、装配知识表示、约束运动规划和制定控制策略的关键. 在产品设计领域, 几何推理将不仅是评价产品可制造性的有力手段, 而且可通过几何推理来对制造工艺进行分析, 得到最优的制造方案, 达到降低制造成本的目的. 例如, 文献 [9] 在分析了净成型工艺对产品几何形状的约束的基础上, 把几何可注塑性分析问题形式化为一个约束满足问题, 并应用几何推理依次确定产品的倒陷特征、分型方向和分型线来实现该约束满足问题的求解, 然后通过颜色映射把从产品 CAD 模型中自动获取的几何可注塑性信息可视化反馈给产品设计人员.

在制造领域中, 有许多制造过程要求它们所使用的作用器(Effector)能够无碰撞地达到目标物体(Object)的一部分或全部表面, 即保证物体某一区域或特征的可达性(Approachability). 这样的制造过程包括数控加工、CMM 测量和模具拔模等, 如应用数控机床加工工件时, 必须保证刀具不与工件或夹具发生干涉. 物体的可达性分析是非常复杂的问题, 它相当于机器人的无碰撞路径规划中寻路径问题. 与可达性相关的一个概念是可接近性(Accessibility), 物体的可接近性是它可达的必要条件. 由于可接近性分析相对来说比较简单, 相关的计算方

法也比较多,因此不少研究人员用可接近性分析近似可达性分析,并应用于刀具干涉检查、工件装夹和模具分型等问题的求解。

针对 CMM 测量、NC 加工和模具分型所涉及的可接近性分析共性问题, Yin^[2,9] 讨论了可达性、可接近性和可视性等概念之间的关系,提出了一种基于可视锥的可接近性分析的统一方法。在点的可视锥基础上,定义了完全可视锥、部分可视锥和局部可视锥等几类特征可视锥,给出了一个基于 C 空间的可视锥计算方法,并应用可视性筛选的思想实现了一个计算可视锥的有效算法。探讨了可视锥在模具分型、装配顺序规划、复杂曲面加工和 CMM 测量规划等制造过程中的应用和实现,建立了 C 空间几何推理的理论基础。

在机器人 C 空间运动规划方面,为了有效寻找在复杂工作环境下最佳无碰路径,朱向阳^[3,4] 提出了伪最小平移距离函数,用于度量机器人与障碍物的距离。与国际上广泛采用的欧氏距离相比,其主要特点是将碰撞检测问题的数学表达由非线性转为线性,计算复杂性少,速度快,建立了机器人 C 空间运动规划和几何推理的理论基础。

2.3 测量数据拟合

测量数据拟合在先进制造技术中发挥着重要的作用。随着现代测试技术的发展,新的坐标测量方法不断涌现,如接触式测量、激光扫描测量、双目视觉测量、以及基于光照模型的单目视觉测量。目前先进的坐标测量系统配置有多种传感器,能够充分集成各种测量方法的优点,实现面向高速化和自动化的精密测量^[10],而坐标测量技术的应用领域也已从最初的几何误差评定和逆向工程扩展到几何误差分析^[11]、精密装配^[12]和无夹具制造^[13]等领域。坐标测量设备和系统所提供的测量数据必须经过相应算法的处理才能得到所期望的信息,逆向工程中数据处理的主要难点是在保留几何形体的拓扑结构和局部几何特征前提下的数据点云稀疏化,这与计算机视觉中的特征识别等问题极其相似,而其他几个应用领域中的计算模型则与几何要素的刚体运动和几何变形密切相关,有许多共同之处,目前针对不同的应用已开发了多种测量数据处理模型和算法,但仍然有两大基础问题尚未很好解决:(1)坐

标测量数据处理的本质是什么?能否建立统一的数学描述方法;(2)影响坐标测量数据处理效率的根源是什么?如何进一步提高计算效率,朱利民和朱向阳等应用机器人无碰撞路径规划中的最小平移距离提出了快速高精度误差评定算法^{1,2)}。这些研究成果表明坐标测量数据拟合与 C 空间和旋量空间的几何推理有着紧密的内在联系。

2.4 基于网络的设计、控制和维护

不同层次的几何抽象的识别和定义是基于网络设计所必需的,不同层次的抽象可以使在分布设计环境下工作的不同的模块,需要不同层次的几何表示,仅提供给工作模块有关的几何抽象信息可避免网络上大量数据的阻塞。Gadh 等^[14] 提出了基于因特网虚拟原型的不同层次几何形状信息抽象模型,为分布式专家系统智能体提供输入信息,提出了不同层次几何抽象以便有效地实现基于网络设计的基本思想。如何根据网络的特点进行不同层次不同截面的几何抽象和特征抽取,将成为基于网络设计的核心问题之一(图 3)。

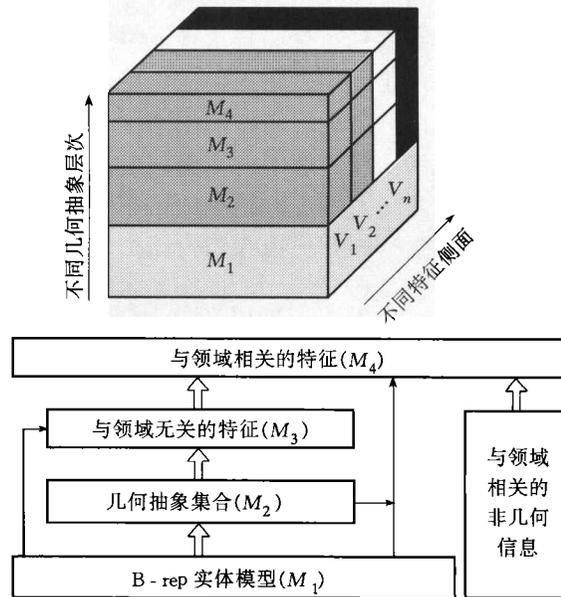


图 3 不同层次几何表示、几何推理的研究

基于网络的控制系統 (Networked Control System, NCS) 是指由传感器、控制器和执行器组成的反馈控制系统中至少有一个环节通过网络来传输控制信息的系統^[15,16]。将网络引入控制系统中,替代

1) Zhu L M, et al. A steepest descent algorithm for circularity evaluation. Computer-Aided Design (待发表)

2) Zhu X Y, et al. Flatness tolerance evaluation: an approximate minimum zone solution. Computer-Aided Design, (待发表)

采用点对点的连线方式,使控制系统具有诸如降低控制系统成本、减小控制系统重量和能耗,简化控制系统安装和维护,提高控制系统可靠性等优点^[15]。传统控制系统和网络控制系统中传感器、控制器和执行器之间的拓扑结构和信息流向如图4所示。

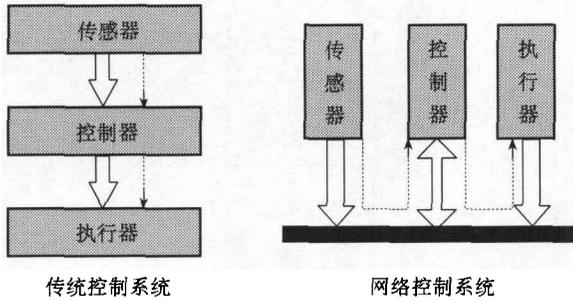


图4 拓扑结构和信息流向图

针对不同控制对象的网络控制系统目前已广泛应用于各个领域。如应用于汽车和工业控制的CAN总线,应用于楼宇自动化的BACNet以及应用于过程控制的Fieldbus(WorldFIP, Profibus)等。随着用于数据传输的以太网(Ethernet)的广泛应用,将Ethernet应用到网络控制系统中的相关研究也引起了广泛关注。

控制网络同数据网络的重要区别在于:控制网络传输的数据包小,传输包的请求频率高,对实时性要求高。针对网络控制系统中存在的问题,文献[15]研究了闭环控制系统的稳定性和在特定类型的调度策略下,传输包的大小两者之间的关系。文献[16]采用研究数字控制系统、混合系统及非同步系统等的技术,对基于局域网的网络控制系统的延时、丢包等重要问题进行了讨论。文献[17]分别对采用以太网、控制网(Controlnet)及设备网(Devicecnet)作为网络控制系统时传输信息的性能进行了评价。并从网络利用率、预期的延时大小和延时特性等关键网络参数方面进行了讨论。文献[18, 19]从任意两个网络结点之间的双向通讯拥塞和包的随机丢失方面,研究了TCP/IP的性能。

将网络引入到控制系统中,由于网络传输中的拥塞(congestion)、随机性或突发性等问题导致对传统控制理论所作的一些理想假设,如控制的同步性,控制器与传感器和执行器之间的通讯无延时等,都不再成立。因而对传统控制理论,需要重新考虑由此产生的影响并作某些修正后,才能将其应

用在网络控制系统中。在网络控制系统中,主要存在以下一些问题^[16]。

(1)网络导致的延时。它包括信号在传感器与控制器之间传输的延时和信号在控制器与执行器之间传输的延时。进一步细分,任意两个网络结点之间的通讯延时还可分为信息从发送者到达接收者的延时,以及接收者返回“确认”信息给发送者的延时。

(2)网络传输中的丢包。数据在网络中传输是以包(Packet)为单位进行传输的。由于拥塞,丢包现象难以避免。

(3)多包传输问题。由于网络带宽的和包的大小的限制,一个完整的信息,可能被分为多个包来传输。在控制系统允许的时间范围内,有可能全部包、部分包或没有包到达包的接收者中。

基于网络的维护系统(e-维护)是集web传感器、信息融合、电子商务、远程测控等技术于一体的,用于设备性能退化智能评估和维护的信息集成技术。主要用于系统设备的性能维护和故障保护,从而使产品制造商和用户的设备能在接近零故障率(near-zero-breakdown)的状态下进行工作^[19]。如何有效地建立面向性能维护的嵌入式智能体,是e-维护的重要研究内容之一。嵌入式智能体就是有效地实现对设备的性能进行智能预测,在故障发生的时候采取相应的措施实现设备的快速修复。嵌入式智能体将设备性能评估分析和传感器、激励器、控制器和人机接口等集成在一起,并作为一个现场预测模块嵌入到设备中,具有嵌入式智能体的设备将使制造商和客户能对产品的性能进行快速评估。如何在理论上建立设备性能渐衰失效(Degradation Failure)的预测分析,将是嵌入式智能体的关键技术。

图5表示的是嵌入式智能体应用于设备性能评估的智能预测系统^[19]。

2.5 计算智能(Computational Intelligence)

计算智能主要包括进化计算、神经网络与模糊系统等。其中,进化计算因其具有自组织、自适应、自学习和本质并行性等特点,与混沌理论与分形几何一起,被认为是研究非线性和复杂系统的新的3大方法之一。进化计算基于自然突变、自然选择的生物进化思想,将复杂的制造系统描述为生物进化模型,利用其自重组、自适应与进化特性,研究制造系统的动态重组与自组织行为。这对于解决

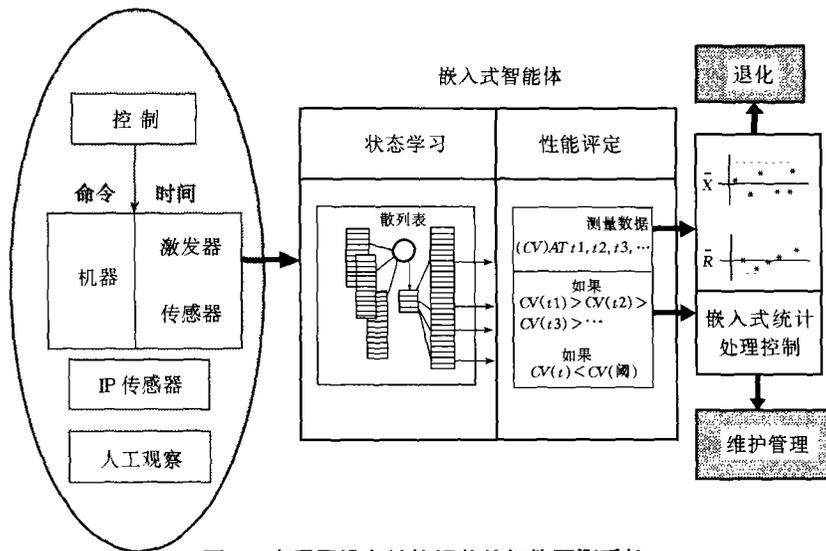


图5 应用于设备性能评估的智能预测系统

分布式制造系统的自组织行为能力与分布式协同这一“瓶颈”问题提供了新的思路和方法，有助于降低这一问题的复杂性。进化计算在制造系统中的应用还包括系统建模、工程优化、最优控制、机器学习与制造机器人等方面。如何有效利用计算智能解决复杂制造系统的不确定性，计算复杂性和冲突问题(trade-off)将成为重要的研究课题。针对制造系统的复杂性，Ding^[20]提出了基于 Recurrent Neural Networks(RNN)的计算方法和体系结构，并应用于冗余机器人的运动规划，所提出的网络模型可广泛地应用于制造系统的最佳调度和规划以及加工过程的优化设计。理论上可以证明：通过硬件实现，所提出的RNN可以在ns数量级内实时求解矩阵的伪逆和运动学反解。制造系统中抓取/夹紧模式的选择是一个复杂的决策过程，它需要丰富的经验。Xiong等^[21]提出了用人工神经网络表示被抓取物体的形状、大小及其所处姿态与抓取模式之间复杂的非线性映射关系，提出了用训练好的神经网络选择抓取模式的方法，从而使得寻找抓取模式这一复杂的过程变得快捷、方便。此外，为了给多指手的力控实时提供设定值，提出了一个基于函数连接网络的实时力规划算法。该算法具有两个优点：不需要事先知道抓取系统的模型；对多臂操作系统、多足机器人等系统中的实时力分配问题同样适用。考虑到机器人系统的很多因素的不确定性，Ding^[22]提出了基于 Fuzzy logic 的避碰操作的推理算法。通过规划恰当的传感任务以得到相应的传感策略，提出了求解操作过程状态改变与转移的机器人有关运

动参数的方法及其优化指标。

2.6 虚拟原型(Virtual Prototyping, VP)

在目前灵活多变市场中，产品的多品种、小批量以及个性化特点日益突出，这种制造模式要求系统对市场的迅速响应，在尽可能短的时间内提供市场所需的高质量的产品。要实现对市场的迅速响应，一个非常关键的问题，是要建立起设计产品的VP。如图6所示，虚拟原型综合应用了计算机支持的建模、仿真和显示技术，对产品及其开发过程进行建模，在产品设计的物理实现之前，在“虚拟世界”对VP进行观察、操作和分析，使人体体会到未来产品的性能并评价产品的可制造性，从而可以作出前瞻性的决策与优化工艺方案。这种VP或数字

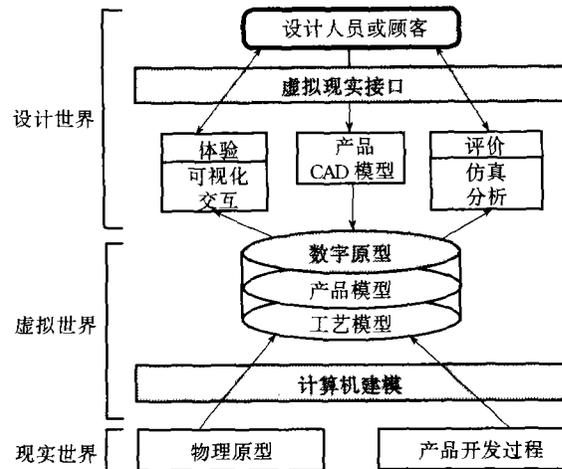


图6 虚拟原型

原型包括产品模型及其相关的过程模型, 具有物理原型所具有的一切关键特征. 设计世界与虚拟世界的相互作用构成了集成产品定义、设计和制造的虚拟设计环境. VP的关键技术包括: (1) 产品表示和建模. 为集成产品开发过程中的所有活动, VP系统应当建立一个完备的产品数据模型, 它包含产品开发过程中所出现的不同类型信息.

(2) 人机接口. VP的一个主要特征是应用了虚拟现实这种全新的人机交互模式, 允许设计人员或用户利用图像、触摸和声音等方式感性体验所设计的产品, 使人们尽可能真实地感觉到产品数据模型的有关信息.

(3) 仿真与分析. 虚拟制造系统中的产品开发涉及设计过程仿真、加工过程仿真和可制造性分析等, 对设计结果进行评价, 实现设计过程的早期反馈, 减少或避免实物加工出来后产生的修改、返工.

致谢 论文写作过程中得到了尹周平、朱利民博士和汪汶等的帮助, 在此表示感谢.

参 考 文 献

- Lee Y S. Manufacturing-drive geometric analysis and prototyping: An investigation of computational manufacturing. Proc of 1999 NSF Design and Manufacturing Grantees Conference, long Beach, USA. 1999; 230
- Yin Z P, et al. Visibility theory and algorithms with applications to manufacturing process. Intern J of Production Research, 2000, 38 (13): 2891
- 朱向阳, 等. 凸多面体之间的伪最小平移距离(I)——定义及其性质. 中国科学, 辑 2001, 31(2): 128
- 朱向阳, 等. 凸多面体之间的伪最小平移距离(II)——机器人运动规划. 中国科学, 2001, 31(3): 238
- Choi B K, et al. C-space approach to tool-path generation for die and mold machining. Computer-Aided Design, 1997, 29(9): 657
- Morishige K, et al. Tool path generation using C-space for 5-axis control machining. Transactions of ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1999, 121(1): 144.
- Xiong Y L. Theory of point contact restraint and qualitative analysis of robot grasping. Science in China, 1994, 37(5): 629
- Xiong C, et al. Stability index and contact configuration planning for multifingered grasp. Journal of Robotic Systems, 1998, 15(4): 183
- Yin Z P, et al. Virtual prototyping of mold design: Geometric mouldability analysis for near-net-shape manufactured parts by feature recognition and geometric reasoning. Computer-Aided Design, 2001, 33(2): 137
- Shen T S, et al. Multiple-sensor integration for rapid and high-precision coordinate metrology. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2000, 5(2): 110
- Wang Y, et al. Manufactured part modeling (MPM) for characterization of geometric variations of automotive spaceframe extrusions. Journal of Manufacturing Science & Engineering, Trans of ASME, 1998, 120(2): 523
- Fainberg Z, et al. Even fitting closed curves: 2-D algorithm and assembly applications. Journal of Manufacturing Science & Engineering, Trans of ASME, 1999, 121(2): 265
- Li Z, et al. Geometric algorithms for workpiece localization. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1998, 14(5): 864
- Gadh R, et al. Geometric shape abstractions for internet-based virtual prototyping. Computer-Aided Design, 1998, 30(6): 473
- Walsh G C, et al. Scheduling of networked control systems. IEEE Control systems Magazine, 2001, 21(1): 57
- Zhang W, et al. Stability of networked control systems. IEEE Control systems Magazine, 2001, 21(1): 84
- Lian F L, et al. Performance evaluation of control networks: Ethernet, Controlnet, and Devicenet. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(1): 66
- Lakshman T V, et al. TCP/IP performance with random loss and bi-directional congestion. IEEE/ACM Trans Networking, 2000, 8 (5): 541
- Lee J. E-Intelligent strategies for product and manufacturing innovation. <http://www.uwm.edu/CEAS/IMS>
- Ding H, et al. Recurrent neural networks for minimum infinity-norm kinematic control of redundant manipulators. IEEE Trans on System, Man and Cybernetics, 1999, 29(3): 269
- Xiong C, et al. Neural-network based force planning for multifingered grasp. Robotics and Autonomous Systems, 1997, 21(4): 365
- Ding H, et al. Fuzzy avoidance control strategy for redundant manipulators. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 1999, 12(4): 513