第47卷第2期 中国科学技术大学学报 Vol.47,No.2
2017年2月 JOURNAL OF UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA Feb. 2017

文章编号: 0253-2778(2017)2-0099-18

基于机械结构的动态物体设计的研究进展

杜 冬,王士玮,刘利刚

(中国科学技术大学数学科学学院,安徽合肥 230026)

摘要: 为了打破传统动态结构设计的专业领域束缚,研究者们提出了一种"从运动到形式"的可计算、交互式设计思路,辅以材质分析、运动学与力学仿真、模型分割、结构分析与布局、碰撞检测、3D打印快速成型等技术,自动模拟动态物体设计制造过程,使得缺乏专业知识的普通用户都能设计出个性化的动态物体,大大简化了结构设计,节约了设计成本.虽然可计算的动态机械结构设计已经取得很大进展,但依旧面临许多物理结构、力学分析、环境感知的问题与挑战.本文基于材料选择和结构设计的差异,将现有的研究工作分为微观、中观和宏观多个尺度进行综述,又根据设计目的和运动方式的不同,进一步将其中研究最广的宏观尺度分为运动驱动、形状驱动和功能驱动三类机械结构设计,并分别介绍各自方法的特点和不足,结合新兴技术、用户体验、场景应用等对机械结构设计今后的研究进行了展望.

关键词: 动态机械学; 多尺度结构; 运动综合; 计算设计; 3D 打印

中图分类号: TP391.73 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.0253-2778.2017.02.002

引用格式: 杜冬,王士玮,刘利刚. 基于机械结构的动态物体设计的研究进展[J]. 中国科学技术大学学报,2017,47(2):99-116.

DU Dong, WANG Shiwei, LIU Ligang. The research and development of dynamic creatures design based on mechanics[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2017,47(2):99-116.

特约评述

The research and development of dynamic creatures design based on mechanics

DU Dong, WANG Shiwei, LIU Ligang

(*School of Mathematical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei* 230026, *China*)

Abstract: To break the confines of the traditional dynamic creatures design, researchers have proposed a new computable, interactive and "motion-to-form" design method, combined with material analysis, kinematic and

收稿日期: 2016-09-28; **修回日期:** 2016-10-20

基金项目: 国家自然科学基金(61672482,11526212),中国科学院"百人计划"资助.

作者简介: 杜冬,男,1991 年生,博士.研究方向: 计算机图形学和机器学习,Email: dongdu@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 刘利刚,中国科学技术大学教授,博士生导师,入选中国科学院"百人计划",中国科学院特聘研究员.2001 年于浙江大学获应用数学博士学位; 2001~2004 年期间在微软亚洲研究院工作; 2004~2011 年期间在浙江大学数学系工作; 2009~2011 年期间,在美国哈佛大学进行学术访问研究.研究兴趣包括计算机图形学、3D 几何建模与处理、3D 打印中的几何优化等.已在计算机图形学顶级期刊 ACM Transactions on Graphics 上发表论文 10 余篇.2012 年获得国家自然科学"优秀青年基金"项目,2013 年获得国家自然科学奖二等奖(排名第三).担任国际会议 GMP 2017 大会共同主席,SPM 2014, SGP 2015, CVM 2016, CAD/Graphics 2017 的论文共同主席; 担任学术期刊 IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, IEEE Computer Graphics and Applications, Computer Graphics Forum, Computer Aided Geometric Design, The Visual Computer 及《软件学报》编委; 担任中国计算机学会计算机辅助设计与图形学专业委员会常务委员,中国工业与应用数学学会几何设计与计算专业委员会秘书长.E-mail: lgliu@ustc.edu.cn

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

mechanics simulation, model segmentation, structural analysis and layout, collision detection, and rapid 3D printing prototyping technology to automatically simulate the dynamic structure design and manufacturing process. It allows causal users to design and fabricate their personal dynamic creatures with rich motion, which greatly simplifies the structural design and saves the design costs. Although computational dynamic mechanics design has made great progress, it is still facing many challenges, such as physical simulation, mechanical analysis, environmental perception, etc. This review divides the existing research into micro, meso and macro multi-scale structure design based on the differences in material selection and structural design. Since the macro-scale design is the hottest, we further divide it into motion-driven, shape-driven and functioning-driven mechanics design, and introduce their features and shortcomings respectively. The future research of dynamic mechanics design is also discussed with the combination of emerging technology, user experience and scene applications.

Key words: dynamic mechanics; multi-scale structure; kinematic synthesis; computational design; 3D printing

特约评述

0 引言

运动是绝对的.小到分子间的相互作用,大到宇宙的膨胀坍缩,运动无处不在.在漫长的岁月中,大自然创造了千姿百态的生灵,它们具有各种不同的运动行为,其中最具有智慧的人类通过不断地观察和学习,掌握了越来越多的运动规律和组成原理,设计出各式各样的动态物体,例如古代的弓箭和工业革命以来的各种机械结构产品.动态物体的设计和生产,不仅丰富了人们的娱乐生活,还推进了社会的进步.

动态物体与人们的生活息息相关,小到玩具、手表等的使用,大到飞机、卫星的设计,无论是简单还是复杂,均是利用不同材质的属性(刚性或柔性),配合不同的结构设计,制造出一些基本的组成单元,然后将其组合装配来完成某一具体功能,不同功能构件之间再组合便形成整个产品系统.如图 1 所示,均为生活中常见的动态物体的例子,有直接使用柔性材料的设计(弹力球、粘性人玩具),有结合结构的弹性材料设计(海绵、弹性支架、弹簧玩具),而更多的则是刚性物体的机械结构设计(跷跷板、路障、雨伞等),它们的应用给人们的生活带来了诸多便利和乐趣.无论是日常生活,还是科技进步,人们已经离不开各种各样的动态结构产品.

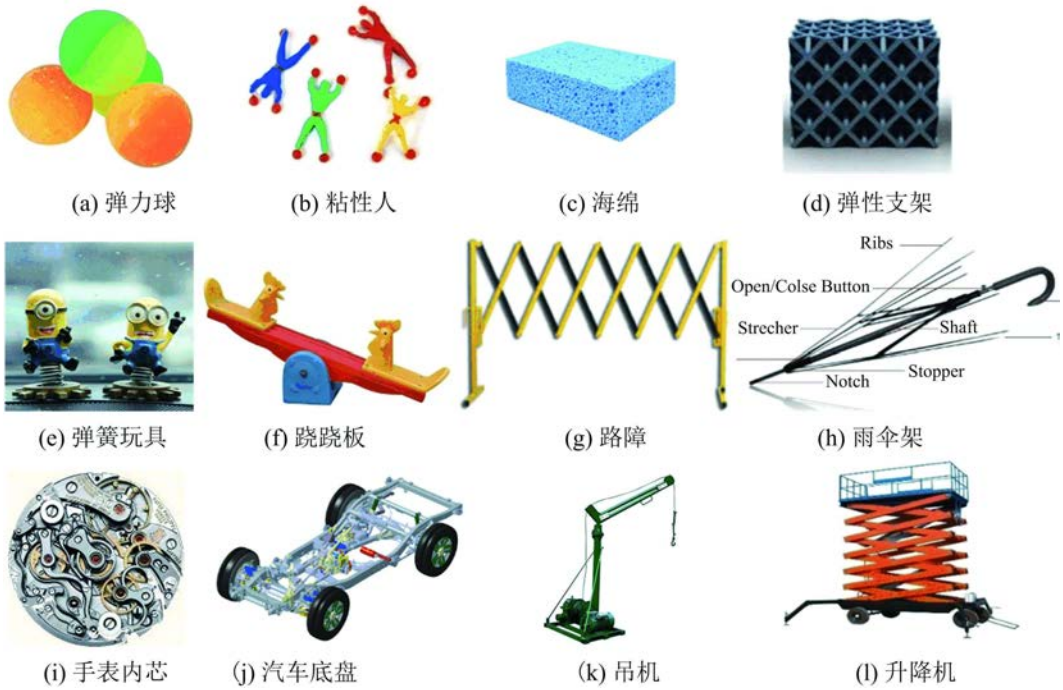


图 1 生活中的动态物体

Fig.1 Dynamic creatures in daily life

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

虽然专家们已经设计出各种各样的动态物体，但这些产品都是批量化生产，个性化定制的成本很高，因为其实现不仅涉及复杂的结构设计，还可能需要单独加工模具进行生产.传统的动态物体设计的门槛很高.要设计出合理可用的动态物体，不仅需要熟悉各类结构的组成原理，还需要有丰富的实践经验，因而长期以来，动态物体设计技术只为少数专业人士所掌握.动态物体设计的困难，不仅提高了设计制造的成本，还限制了其推广与创新发展.而 21 世纪以来，人们对私有定制的个性化商品需求越来越大，尤其是 3D 打印、激光切割等新型制造工艺的快速发展[1-2]，省去了传统工艺需要单独制造模具的代价，极大地满足了人们对“个人制造”的需求，全民参与设计、制造的时代已经到来.由此诞生出一些面向普通用户的可计算的动态物体设计方法和系统，它们将传统的材质分析、结构设计、机械原理等问题转化为相应的参数模型及约束，通过一定的优化方法自动寻找可行解，再借助制造工艺生产出个性化的动态物体.

可计算的动态物体结构设计在近 5 年内得到了快速发展.其主要目的是通过合理的模型计算将设计者从大量繁琐、复杂的结构设计中解脱出来，更能使无相关设计知识的普通用户设计出自己的动态结构，推动个人设计制造的发展.相应的工作从不同的尺度上可分为微观、中观和宏观结构设计，分别从材料本身结构性质、材料形状结构性质和机械结构性质进行分析，设计出满足不同需求的动态物体结构.如图 2 所示为动态物体结构设计的相关内容概述.本文将从三个尺度上分别介绍动态物体的结构设计，并重点阐述基于机械结构的动态物体设计的研究进展.

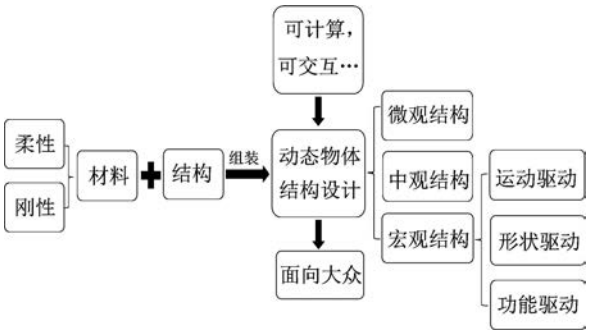
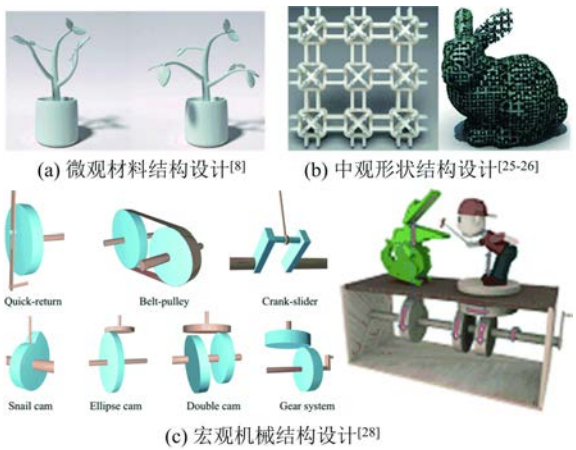


图 2　动态物体设计

Fig.2　Dynamic creatures design

1　多尺度的动态物体设计

一般材料有刚性和柔性两种特性，高刚性的材料在外力作用下形变很小，而高柔性的材料能产生较大程度的形变，这主要跟材料弹性模量的大小有关[3-4].根据组成具体功能(形变、运动等)的基本单元的尺度大小，本文将动态物体设计分为微观、中观、宏观三种尺度的结构设计，如图 3 所示.利用材料的柔性，直接产生形变，设计不同的动态物体结构，便属于微观结构设计[5-9]；基于材料性质，先设计出一些基本的能产生不同程度形变的结构类型，再基于这样的结构进行设计，属于中观结构设计[10-27]；而利用分段刚性物体之间不同的装配组合、运动传导来产生形变的结构设计，属于宏观结构设计[28-47].近年来，涌现出许多不同尺度的动态物体结构设计研究，更有混合多尺度进行结构设计的工作.如文献[7]不仅利用了柔性材料良好的形变能力，还结合了刚性结构设计，利用一些外部驱动和运动传导精密控制物体的局部运动和变形，获得了更丰富的形变效果；文献[14]借助形状记忆合金(微观材料性质)和中观尺度的弹性铰链结构设计，通过反复的有限元分析，构造出了简单易于制造的微夹钳，以便更好地处理微小的零件.下面将分别介绍这些结构设计.



(a) 微观材料结构设计[8]　(b) 中观形状结构设计[25-26]

(c) 宏观机械结构设计[28]

图 3　多尺度结构设计[8,25-26,28]

Fig.3　Multi-scale structural design[8,25-26,28]

1.1　微观结构设计

在计算机图形学、物理及工程制造等相关领域，柔性材料的物理属性和细微结构都得到了广泛研究，人们通过建立参数模型，分析、拟合材料性质，仿真模拟柔性物体的变形[48-56].由于通过手动选择正确的非线性材料模型相关参数和多种材料的正确分布来设计柔性物体，使其获得指定的运动或形变方

特约评述

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式十分繁琐和困难，Bickel 等[57] 和 Martin 等[58] 通过建立样例，测量相关参数，提出了一种基于数据驱动的方法进行设计，虽然获得了丰富的仿真结果，但都无法直接与现实可制造的柔性物体联系起来.因而面向制造的设计研究工作依旧困难，且十分重要.

首先通过材料的薄厚分布使物体的不同部位拥有不同程度的形变能力，再利用大头针固定，细线牵引或手动进行驱动

图 4 基于材料结构设计的可变形物体[7]

Fig.4 Deformable creatures design based on material structure analysis[7]

由于高柔性的材料在不同力作用下能产生不同程度的形变，因此可以通过分析力和形变之间的关系及不同材料的柔性大小，选择材料的类型，调整材料的分布，设计可变形的动态物体.本文称这类动态机械结构设计为微观结构设计，或材料结构设计.它们主要利用树脂、橡胶等柔性材料设计出拥有用户期望形变或运动的动态物体.如 Bickel 等[5] 基于数据驱动的处理方法，提出了一套完整的测量、设计和制造拥有不同形变能力材料的方案.它测量拥有不同的复杂微观结构的材料的形变能力，利用有限元方法建立非线性的压力-张力模型，并用径向基函数进行拟合，获得材料库，通过不断仿真来获取不同材料堆叠后产生的形变效果，并与 3D 打印制造的实物进行对比校正.Skouras 等[6] 将气球模型在几何上分解为一层层堆积的橡胶薄层，在气球膨胀过程中，每层橡胶薄层受到拉伸和弯曲变形，以维持内部压力和薄层张力的平衡，通过对不同厚度薄层变形过程的大量实验，可以获得相应参数，模拟并控制整个气球在膨胀过程中的形状变化，使其趋近用户指定的形状，从而制造出许多拥有复杂形状的气球，但这种方法无法做到精细的局部控制.随后他们又尝试同时使用不同材料(刚性、柔性)来模拟实际生活中的角色运动，例如人既具有刚性的骨架结构又具有柔性的肌肉组织，通过优化刚性、柔性材料的空间分布，辅以少量驱动(添加驱动达到局部控制的目的)来使最终制造的模型拥有用户期望的形态变化[7](图 4)，然而这些形态变化是根据用户输入的目标形状(关键帧)插值而来，其变化过程并不唯一，甚至可能不自然.由此 Wang 等[9] 提出了一种基于数据驱动的方法，通过深度相机扫描捕获物体形变过程中对应的点云，不断迭代追踪物体随时间变化的物理形状，优化形变参数，模拟一般的柔性物体变形过程，并能对存在噪声、遮挡、快速移动和大形变的情形保持鲁棒，但该方法首先需要获得高质量的初始物体网格，以作为后期追踪注册的模板.

虽然柔性物体的设计与制造在计算机动画和视频游戏中已经十分普遍[9]，且越发引起 3D 打印制造真实世界物体领域的关注[7-8]，但要直接设计出用户期望的形状，且保持静态平衡的柔性物体是不容易的，因为它会在外力(如自身重力等)的作用下产生多种可能的形变，影响最终制造出的物体形态.这便需要设计者根据材料的性质精密设计，严格控制制造的过程，并反复试验.Chen 等[8] 提出的逆向形状设计方法极大地简化了这一过程，它使用户在整个设计过程中只需关注柔性物体的最终形状(目标形状)，无需用户来考虑材料本身在重力作用下的形变情况，通过渐进数值方法(asymptotic numerical method)[25-26] 自动计算获得可用于物理制造的静态形状，比传统的牛顿迭代求解快很多[6,27].但囿于 3D 打印等成型工艺的精度限制，难免存在制造误差，使得最终的柔性物体的形状产生偏差.

1.2 中观结构设计

柔性材料普遍存在于人们的生活中，如衣服、鞋子、家具、植物甚至人的皮肤等，其形变效果丰富多样，可从多个尺度上进行参数化建模，小到分子间相互作用产生的形变，大到全局结构产生的功能性形变[59-62].囿于多种材料组合设计的困难，又因为近年来“粗大化”、“同质化”材料研究[63-64] 发现，微观尺度上复杂的材料形变可以通过中观尺度上同质均匀的材料去逼近，因而可以将小尺度的材料进行适当组合、设计不同的形状结构来产生期望的大尺度上的形变.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

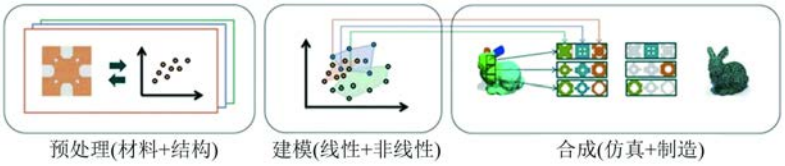


图 5　中观(形状)结构设计方法[10-11]

Fig.5　Meso-structural design method[10-11]

基于这样的原理和需求,研究者们利用不同材料的柔性,结合形状设计、结构设计,产生了更加丰富的形变和运动,本文将这种材料性质加上中观结构的设计方法称为中观结构设计,或形状结构设计.通常方法如图 5 所示,首先对不同材料和结构(形状)进行预处理,参数表达并建立模型,获得不同属性的材料空间,再利用这些材料进行合成,产生指定形变情况的柔性物体.如 Panetta 等[10]设计了 6 种弹性各不相同的纹理模块,即可参数化、可堆砌、可 3D 打印的小立方体模块,它们相互之间柔性差异大,可组合获得广泛的形变效果,通过优化纹理,在物体的不同区域选择不同的材料以获得指定的变形.Schumacher 等[11]同样先构造不同结构,获得粗化的材质空间,再利用这些结构合成给定物体及其材料属性(如图 6).Piovarči 等[12]更是加入了触觉交互,通过"心理物理学"实验,设计不同的结构,产生 12 种不同的可打印的非线性弹性材质,测量不同力作用下的位移,来表达材质的软硬属性,建立"知觉空间",模拟人对软硬不同的材质的触觉感知;然而该工作只考虑了沿物体表面法向方向的"刺"的交互方式,并未实验不同的交互方式和作用力方向.

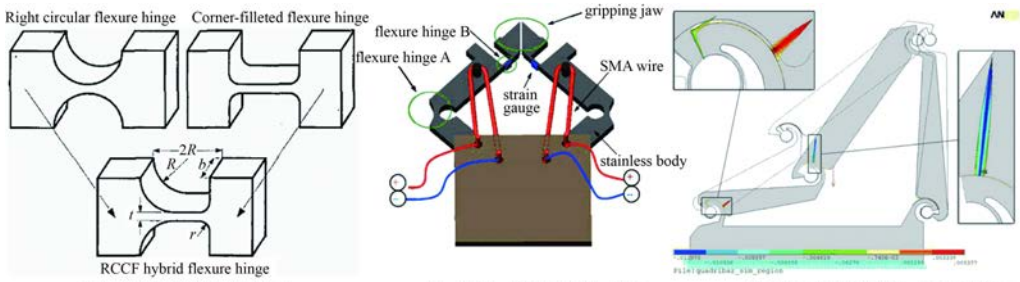
给定一个虚拟物体各个部位的弹性材料属性(如图中的蓝色表示柔软,红色表示坚硬),系统自动通过中观尺度的结构设计来逼近预期的形变效果,并且只利用单种材料制造出来

图 6　基于形状结构设计的可变形物体[11]

Fig.6　Deformable creatures based on shape structure design[11]

除了基于高柔性材料进行结构设计,高刚性的材料也可结合不同的形状结构来产生弹性,常见的有弹簧、发条等结构[65-67].在工业制造领域,形状结构设计工作更加丰富,如关于屈曲铰链的形状结构设计[13-27],通过有限元分析,设计不同形状的屈曲结构来产生不同的形变效果,以用于制造具体功能的产品.如图 7 中只是显示了其中比较简单的 3 种屈曲铰链,以及基于它们的产品.

中观结构设计不仅需要考虑不同材料的性质,更要结合不同结构、形状设计,因而在建模、仿真和制造上更加困难,是未来的研究重点之一.



(a)不同形状的屈曲铰链[16]　(b)基于屈曲铰链的微夹钳[17]　(c)基于屈曲铰链的微电子系统[26]

图 7　屈曲铰链形状结构设计[16-17,26]

Fig.7　Buckling hinge structure design[16-17,26]

特约评述

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1.3 宏观结构设计

由于高刚性的物体在外力作用下形变很小，几乎可以忽略，所以在材料性质的分析上要容易很多，其应用也更加广泛.通过将分段刚性的机械零件进行组合，同时考虑力学、运动学等知识以及结构布局，使整个系统具备某一类运动或功能，这样的结构设计为宏观结构设计，本文特指机械结构设计.它们通过自动分析处理基本元件，构建数据库，并建立求解模型，不断优化相应参数，使得设计者无需专业知识，不用考虑具体细节，都可以设计出属于自己的个性化动态机械产品.

综上，基于不同材料的性质与分布，结合不同尺度的结构设计，动态物体设计可分为微观的材料结构设计、中观的形状结构设计和宏观的机械结构设计，更有柔性、刚性材料同时使用，混合宏微观结构的多尺度动态物体设计，其每一方向都有很多相关工作.而本文将重点阐述宏观尺度上的基于机械结构的动态物体设计的研究进展，对其他尺度的研究工作不再详述.

2 基于机械结构的动态物体设计

生活中最常见的便是基于机械结构的动态物体，如图 1 中显示的雨伞、手表等日常用品和吊机、升降机等工业机器，它们均是通过分析力学和运动学传导知识，将基本的刚性部件进行组合而成.根据设计者的知识层面和实践经验的不同，设计出不同复杂程度的机械结构产品.为了减少人力，使设计者从大量繁琐的细节操作中脱离开来，也使得无专业知识的普通人能进行机械结构设计，研究者们提出了许多可计算的、基于机械结构的动态物体设计方法和交互系统[28-47]，它们只需通过少量的用户编辑便可自动设计出拥有期望运动的动态物体.

2.1 机械结构简介

机械结构，简称机构，是指由两个或两个以上构件通过活动联接、用以传导力和运动的可动装置，它是机械装备的特征骨架和执行器[68].有关机械结构的研究设计源远流长，它伴随人类文明发展，又促进了社会进步.早在中国古代的墨子(约公元前 480 年)便在机械结构设计方面有着很多惊人的成就，他制造的舟、车、飞鸢等都体现了机械结构设计的原理.同一时期的鲁班还设计出曲尺、墨斗、刨子等工具，成为中国建筑和木匠鼻祖[69].第一次工业革命以来，机械结构设计得到了飞速发展，各类精密仪器如雨后春笋般出现，它们以蒸汽、电力、原子能等为驱动，完成各类运动、功能，服务于人类社会.

图 8 一些基本的机械零件

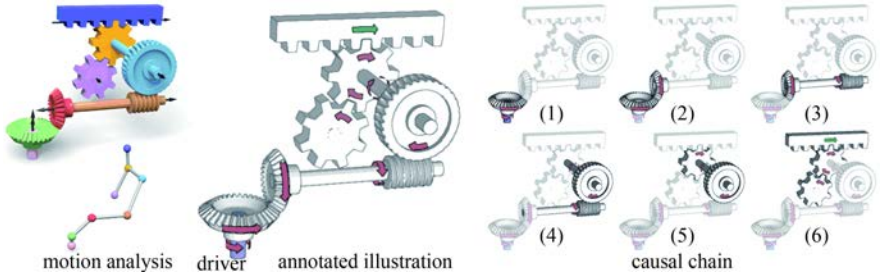
Fig.8 Some basic mechanical parts

2.2 可计算的动态机械结构设计

可计算的动态机械结构设计方法将传统的基元分析、构件装配、运动分析与综合、交互分析等问题转化为相应的参数模型及约束，通过一定的优化方法自动寻找可行的最优解，再借助快速制造工艺生产出个性化的机械结构产品.如图 8 所示为一些常用的基本机械构件，通过分析它们的功能，不断组合产生新的动态机械结构物体.2010 年，Mitra 等[3]最早从几何出发，辅以少量用户输入，罗列分析了一些常规构件的功能以及它们之间的力和运动的传导方式，再通过对 3D CAD 机械结构模型进行对称性检测、接触性检测、运动计算等，推断其工作原理和动画过程，最后利用箭头、高亮等方式加以可视化绘制，如图 9 所示，它将对机械结构模型的理解分为两

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

步: 先是分析各构件的空间布局,然后分析各构件间的力和运动的传导,即交互链.随后越来越多的学者认识到机械结构的可自动分析与设计的可能,通过逆向分析,已知机械结构的目标运动,首先分解获得基本构件的类型,再通过运动传导原理将拥有不同功能的构件进行组合,构造交互链,然后优化构件参数(大小、形状等)及装配结构(位置、支撑结构等),最后获得具有用户指定运动的机械结构.再加上不同材质(刚性、柔性)的组合,复杂的力学与结构分析,设计出更丰富的动态机械结构.



给定一个基于机械结构的几何模型后,系统自动分析每一部分的运动情形和不同部分之间的交互情况,并利用箭头、关键帧的形式进行可视化

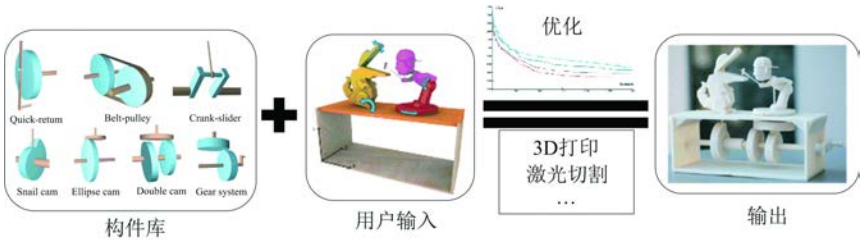
图 9　机械结构模型的可视化分析[70]

Fig.9　Visualization analysis of mechanical structural models[70]

根据设计目的和交互方式的不同,本文将主要的工作分为三类: 运动驱动、形状驱动和功能驱动的机构设计,分别依据用户指定的运动情形、形状变化和特定功能来设计动态机械结构,下面将进行详细介绍.

3　运动驱动的机械结构设计

随着"个人制造"的提出和发展,越来越多的计算机图形学工作者开始关注可计算的机械结构设计,开发出面向普通用户的机构模型设计系统,使没有相关知识的普通人也可以独立设计有趣的玩具.在可计算的动态机械结构设计初期,主要解决如何自动设计机构来驱使玩具按照用户指定的运动方式来工作的问题.通常可分为两个子问题去求解: 分解运动,确定用于装配的各个构件的类型; 确定各个构件的位置和自身参数,使其整体运动逼近用户的输入且避免各构件之间的碰撞.其结果的好坏和多样性主要取决于三方面: 数据库中已分析的构件类型的丰富性、用户交互的合理性和优化模型的构建与求解的准确性.如图 10 所示,首先分析各种基本构件并建立数据库,通过不同的用户输入,搜寻相关结构并进行组合优化,最后通过 3D 打印等成型工艺进行制造验证.



首先分析、参数化各类基本的机械构件,给定模型后,用户通过交互指定模型各部分的运动情形,系统自动通过优化设计出整个动态物体的机械结构,并利用 3D 打印、激光切割等成型工艺生产制造

图 10　运动驱动的机构设计方法[28]

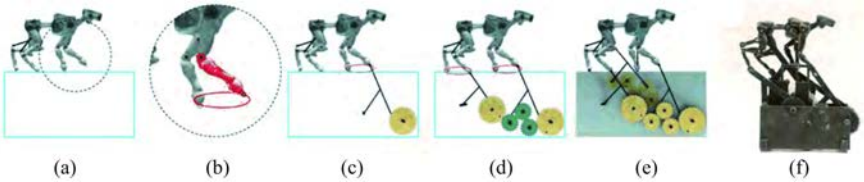
Fig.10　Motion-driven mechanism design method[28]

3.1　基于运动逼近的机械结构设计

当指定目标运动后,系统需要自动计算设计出拥有尽可能相近运动的机构.Zhu 等[28]最早给出成功的解决方案,它将整个机构角色分为两部分: 角色特征部分和机构装配部分.首先对已有的基本构件进行分类分析,并作相应的参数处理,用户只需给定 3D 模型的几何特征、运动方式以及机构装配盒的尺寸,系统便可自动计算确定构件的类型; 然后利用逆向运动学仿真的方法[71]逐层分析这些构件之间的运动关系,并用模拟退火法[72]求解基本构件的形状

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参数和装配位置，以优化运动方式的相似性、机构布局的质量以及拓扑结构的复杂性，使得最终的结果能利用尽量少的构件完成与用户输入尽可能相同的运动，且各构件之间没有碰撞；最后利用 3D 打印等工艺将玩具制造出来.



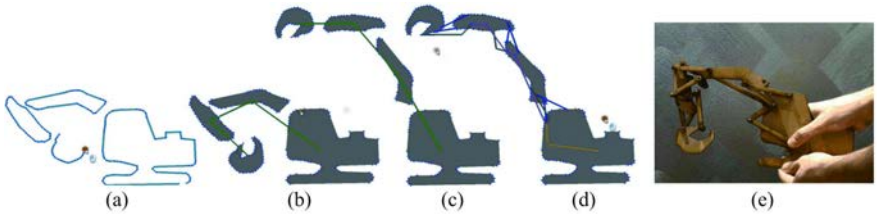
给定铰链模型和齿轮装配盒的位置、大小，用户通过草图绘制模型运动轨迹，系统自动设计相应的齿轮组合，并联合各个部分的结构，最终逼近预期运动效果，并用于生产制造

图 11 基于草图与齿轮结构的计算设计系统[29]

Fig.11 Computational design system based on sketch and gear structure[29]

基于草图交互[73]和设计画廊[74]的相关工作，Coros 等[29]提出了一种更加直观便捷的交互系统，使得普通用户可以直观地设计出更加复杂的机构角色.该系统同样需要对基本的齿轮构件进行预处理，参数化每类构件，并对参数化空间进行稀疏采样，获得每类构件的典型运动.如图 11(a)给定铰链式的机械角色和用于装配齿轮机构的区域，用户通过绘制运动轨迹的草图来指定具体部位的运动形式(图 11(b))，对于每次输入的草图，系统利用预处理的数据库自动求解最优的齿轮装配组合以获得尽可能相似的目标运动，再通过铆接将机械角色的特征部位与齿轮组连接起来(图 11(c))，如此反复进行下去，直到用户给出所有部位的运动情况(图 11(d))，这时系统再将各个部位的运动连接组合到一起，通过分析力和运动的传导，进一步优化结构参数，最终得到只需一个驱动器便可运行整个装置的机构，最后系统再给出整个系统的支撑结构(图 11(e))，并利用 3D 打印等工艺制造出最终的产品(图 11(f)).

同样基于草图，Megaro 等[31]给出更加自由的交互设计系统，能更大程度地发挥用户的创造性.用户不仅可以给定角色的运动方式，还可以创造相应的机械角色.如图 12(a)所示，用户绘制角色特征，指定连接区域(即圈出需要连接的两部分的中间区域)，随后给出两幅关键帧的运动情形图(由图 12(b)拖动相应部分产生图 12(c))，系统便可自动计算生成可产生该类运动的机械结构(图 12(d)，主要基于连杆结构)，最后便可用于生产制造(图 12(e)).由于 3D 草图建模的复杂性，该方法只给出了 2D 角色设计的应用.



用户手绘模型各部分的几何形状，通过拖动给定两个关键姿势以表示运动的范围，系统自动设计出基于连杆的机械结构，连接各部分，达到预期的运动效果

图 12 基于 2D 草图与连杆结构的计算设计系统[31]

Fig.12 Computational design system based on 2D sketch and linkage structure[31]

当文献[29]给出一个驱动器后，机械角色的运动便由齿轮组和其自身的铰链结构决定，而力和运动在角色的每个部位间相互传导，这样得到的结构运动方式比较单一.为了增加运动的多样性，可在不同的部位增加电机作为驱动，再根据连接协调各部位的运动，但这无疑增加了产品的制作成本和优化模型的复杂性.为了规避这一问题，Ceylan 等[30]设计出了“振荡模块”，可将旋转运动转化为振荡运动，使得运动链中的每个部分都可能处于不同频率和阶段的振荡运动中.如图 13 所示即为整个振荡模块的工作方式：由四连杆机构将单向的旋转运动转化为振荡运动(图 13(a))，再由输出曲柄将该振荡运动传递给与其连接的部分(图 13(b))，或者用滑轮将旋转运动传递给其他部件(图 13(c)).通过振

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

荡模块的使用，该系统可自动设计出模仿人类行走、跳跃、跳舞等运动行为的机构装置. 相似的，Itotani 等[33]通过在铰链角色的关节连接处嵌入可扩展的气动驱动器[75]，使角色拥有下蹲、假摔等运动行为.

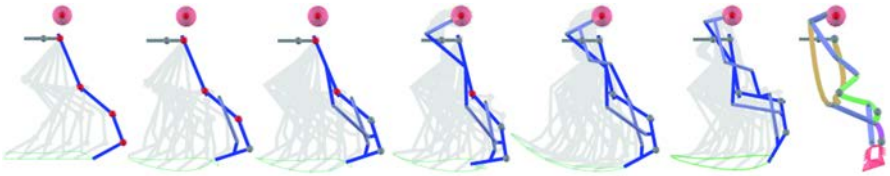
(a)　(b)　(c)

通过四连杆、曲柄、齿轮、皮带轮将固定频率的旋转运动转化为不同频率的振荡运动

图 13　振荡模块[30]

Fig.13　Oscillation module [30]

随后，Thomaszewski 等[32]也提出了一种通过用户交互、利用连杆结构逐步减少初始电机的设计方案. 该设计系统分为三个阶段: ①拓扑结构设计. 当用户给定想要的周期运动后，基于以前的工作，系统首先合成可做该运动的全电机机械结构，该结构由刚性的连杆组成，并且每个连接节点都由电机组成，以驱动相应部分做预期的周期运动; 然后由用户指定取消某一电机，并通过额外的连杆连接，传输相应运动，如图 14(b) 取消最下面的电机，指定最下面的连杆与其上某个本不直接相连的杆之间添加额外的连杆连接. 由于所添加的连接不同，其运动的结果也会不同，这些结果都会在设计系统的界面显示，用户可通过预览选择可产生最接近运动的结构. 但由于系统数据库有限，有时可能不存在这样的可选结果，这时便需要指定最下面的连杆与其他连杆进行连接，依次进行下去，直到只留下一个电机驱动得到期望的运动，如图 14(b) ~(e) 所示. ②全局优化. 由于第一步主要确定机构的拓扑结构，其运动结果可能和原始差异较大，需要进一步优化各个连杆结构的参数以使结果逼近用户输入的运动，同时保证机构的合理性(无碰撞) ，如图 14(f) . ③形状优化. 系统提供了十分简单的交互去改变连杆的形状，使最终的机构更加美观，如图 14(g) . 同年，Bächer 等[36]提出了一种“符号运动学”方法，可实时编辑、优化连杆机构，并能保持机构的正确性，获得指定的运动功能.



(a)　(b)　(c)　(d)　(d)　(f)　(g)

给出拥有指定运动的全电机结构，用户不断交互减少电机(图中红色点) ，系统自动设计连杆机构以保持原来的运动情形，最后优化获得可制造的动态物体

图 14　基于连杆结构的机构设计[32]

Fig.14　Mechanism design based on linkage structure [32]

3.2　基于物理特性的机械结构设计

基于运动类型的可计算、交互式机构设计研究工作主要的目标是利用尽可能简单的结构、更少的资源模拟逼近用户给定的运动，并设计制造出相应的机械结构产品. 然而之前的工作只考虑了机构几何布局的合理性以及各构件之间力和运动的传导，并没有考虑重要的物理特性，如自支撑性和稳定性，因而设计出的运动只具有观赏性，并不能鲁棒地独立运行. Bharaj 等[34]首先将连杆结构分解为一系列铆节点、杆以及相应的随时间变化的运动序列，并进行参数化表达，可产生稳定行走运动的连杆配置空间(数据集) ，用户只需要通过简单的拖动，将 2 ~ 4 个连杆模板放置在机械角色身体的任意位置，系统便可基于物理仿真、全局优化[76]机械结构的配置与运动时的物理属性，自动寻找可稳定运动的方案，而用户也可交互编辑其行走方式和路线[37].

为了使自动玩偶能独立稳定地行走，主要的优化问题考虑 5 个目标，如下公式所示:

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

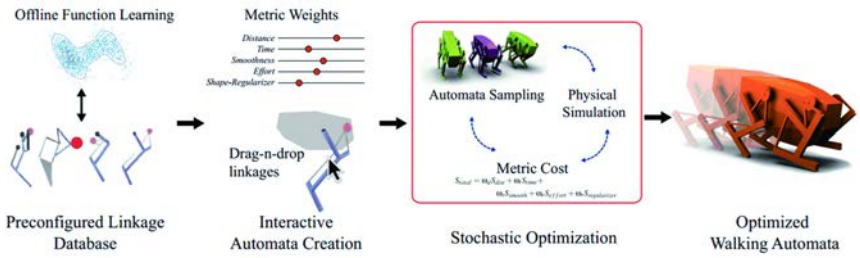


图 15 自动行走玩偶的机构设计方法[34]

Fig.15 Mechanism design method of automatic walking doll[34]

$$S_{total} = \omega_d S_{dist} + \omega_t S_{upright} + \omega_s S_{smooth} + \omega_e S_{effort} + \omega_r S_{regularizer}$$

式中，S_{dist} 表示期望自动玩偶朝着给定的方向前进，其值为前进距离的负值；$S_{upright}$ 能量是为了约束玩偶在运动过程中保持正朝向；$S_{smoothness}$ 为了约束运动的连续性，惩罚突然的加速或减速；S_{effort} 约束机械结构内部的作用力尽量小，以维持结构的稳定；$S_{regularizer}$ 为了约束每步的迭代优化、参数变化不要过大，以保证求解的稳定性.通过加权优化这些能量项，可最终求解到稳定行走、各部分间无碰撞的机械结构.

同年，Megaro 等[35] 提出了一种“端到端”的基于优化的交互设计方案，即设计阶段系统反馈的结果与期望的真实世界结果相同.它利用可以变速的“伺服电机”，辅以用户交互，可设计出拥有非周期运动、且能稳定行走的机构玩具.系统首先载入指定角色骨架结构的描述文件，用户可以对其进行编辑，并通过增删关节点处的电机或调整电机的位置来改变角色运动形态，通过“步法”训练使角色拥有非周期的运动轨迹.用户可指定角色某一个时刻的运动状态，具体到某只脚是站立还是悬空，系统会根据交互情况将其真实运动情形实时地反馈出来，以便进一步调整.除此之外，系统还提供给用户更大的创作空间，如通过骨架设计创作机械角色的形态，包括其含几条腿以及腿的形状等，实时交互设计步伐运动，根据运动过程中角色的质心变化，统一优化机械结构和各构件参数，产生可打印、无碰撞的几何形状，最后通过 3D 打印成型，装配上相应电机便可运动起来.

虽然学者们已经开始研究模拟动物行走的机械结构交互设计系统，但为了降低问题复杂度，并没有考虑更多的力学分析和结构分析，因而对于两只脚行走的机构，依旧无法保证其应有的稳定性，实际运动过程中便会倾倒.除此之外，机构的运动大都是简单的周期性运动，用户的交互方式也很有限，最多是二维的草图，并且机构对外部环境并不能适应，一旦机构成型，其只能在具体的场景中才能使用.这些假设和约束都严重限制了可计算机械结构设计的推广和应用，因而更复杂的物理仿真与环境交互系统急需进一步的研究.

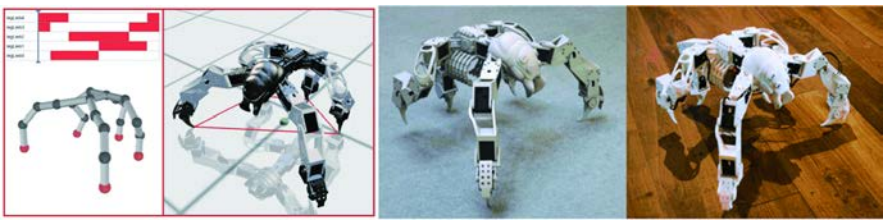
4.1 基于模型分割的形状驱动设计

早期的研究工作中，机构在形态上的变化并不丰富，如 Cali 等[38] 和 Bächer 等[39] 提出了“关节机构”，首先将给定模型分割成不同的组成部分，再通过给定的关节模板[38] 或链式关节、球状关节[39] 将不同部分适当拼接起来，同时考虑几何和力的约束，使最终打印出的模型可以变换不同姿势.虽然这样的设计方法不能指定模型严格按照设计者意图变换形态，但显示出了形状驱动机构设计的本质，即分割与连接.在设计者给出初始模型和目标形状后，首先将模型进行分割，建立各部分的连接关系，再通过相应的关节将它们连接起来，根据拓扑约束（连续、无自交等）和几何约束（保持体积等）不断优化模型的分割和各部分的连接及关节结构，最终得到可连续变换到目标形状、各部件无碰撞的机械结构[40].然而文献[40] 给出的方法只能将给定的模型变换到正方体，且由于关节之间距离过近，需要配合胶水、油灰等将各部分连接到一起，也无法保留原模型的特征，最终 3D 打印制造出来的模型较粗糙.

4 形状驱动的机械结构设计

根据设计者的意图，机械结构除了可以按照指定的运动轨迹运行，还可以直接发生形态上的改变，常见的如变形金刚玩具，由车的形状连续变化到机器人的样子.本文称这类给定初始形状和目标形状，系统自动给出机械结构及其变化过程的设计为形状驱动的机械结构设计.

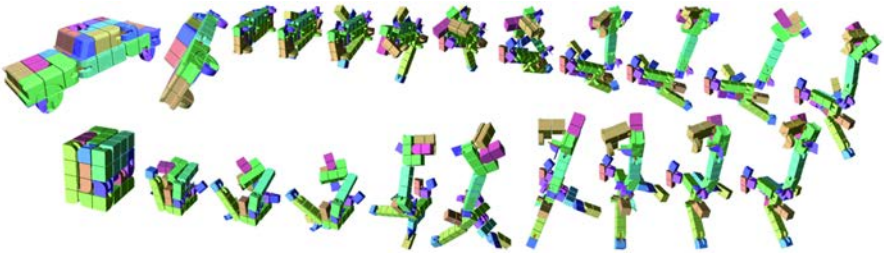
?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



用户交互设计模型的骨架结构与运动步伐，系统设计优化机械结构的运动性能，仿真模拟，最终制造出可独立行走的动态物体

图 16　可 3D 打印的机器人角色设计[35]

Fig.16　3D-printable robot creature design[35]



给定初始模型和期望的变形结果，系统自动进行模型分割，设计子块之间的连接及关节结构，使得初始模型能连续变换到目标形状

图 17　形状驱动的机构变形过程[40]

Fig.17　Shape-driven mechanism deformation process[40]

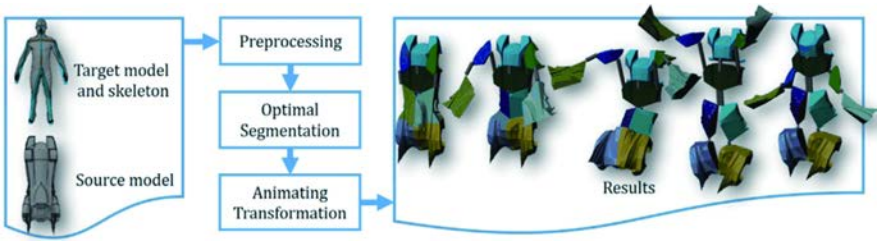


图 18　基于骨架嵌入的机构设计方法[42]

Fig.18　Mechanism design based on skeleton embedding[42]

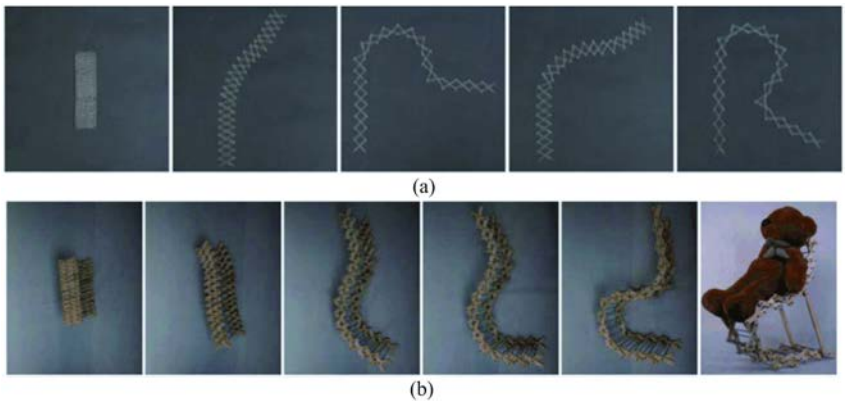
随着形状变化越来越复杂，连接各部分的关节点越来越多，自由度越来越大，整个优化问题变得十分困难.为了满足复杂形状变化的需求，Huang 等[42]通过给定目标形状的骨架与关节来指导原模型的分割及各部分间的连接关系，降低问题求解的复杂度.如图 18 所示，系统首先对输入数据做预处理，包括对齐关节点、缩放骨架以嵌入原模型，然后利用模拟退火算法[77]优化模型分割，最后“由粗到细”处理变形过程：先利用最短路径算法找到最好的一条变形路径（整体设计），然后利用双向 RRT（rapidly-exploring random tree）开花算法[78]计算每个关节点的运动方式（局部调整），使得原模型可以无碰撞地连续变换到目标形状.受魔方和拼图玩具工作原理的启发，Sun 等[41]通过使用弯曲的可旋转关节连接，辅以用户交互分割，设计出如魔方般的机械结构，使模型可以绕中心轴旋转变形.

4.2　基于剪刀结构拟合的形状驱动设计

不管是变形到立方体，还是辅以人的骨架指导，抑或是根据魔方原理，以前的工作都限制了形状变化的可能.而 Zhang 等[43]和 Wang 等[44]基于剪刀结构的机械结构，真正实现了自动设计完成任意两个形状之间的连续变换.它首先设计并定义了平行、等角、对称三种基本的剪刀单元[79-80]，并仿真模拟其运动过程[81]，然后将整个设计过程分为“拓扑构造”和“几何优化”两个过程.对于给定的 2D 初始形状和目标形状，首先生成 2D 曲线的对应关系[82]，并用预处理过的剪刀单元分段拟合，确定剪刀的数目，然后进行几何优化各剪刀单元的参数.这里，要求变形过程中连接点的形变量尽量小（避免剪刀结构发生断裂）、整体结构初始形状和最终形状都与输入的差异尽量小.通过仿真实验和制造成型验证，在一定的制造误差内，该方法产生的机构可模拟任意形状之间的连续变换.然而，囿于三维情形的自由度很

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

高，结构之间的碰撞检测和规避十分复杂，该方法并不能直接推广，所以三维情形的任意形状变换的机械结构设计仍然有待研究.



给定初始模型和期望的变形结果，系统基于不同类型的剪刀结构进行形状逼近，优化机构参数，设计出可从初始形状连续变换到目标形状的动态物体

图 19 基于剪刀结构的动态机构设计[43]

Fig.19 Dynamic mechanism design based on scissors structure [43]

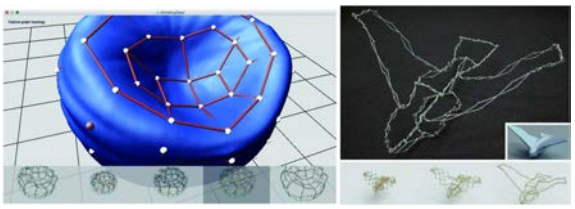
5 功能驱动的机械结构设计

机械结构的设计不仅仅是为了个人娱乐、制造玩具，或者用于教育、训练孩子的创造性，其最终的目的还是能应用到具体生活中，解决一些实际的问题，便利人们的生活.

5.1 节省空间的机械结构设计

近年来，随着建筑设计[83]、3D 打印制造[84]和机械物体原型设计[85]的研究发展，家具设计制造中的问题受到了广泛关注[84-89].为了使家具节省空间，便于存放和运输，研究者通常将家具模型分割成一块块可翻转、折叠、收缩的模块，并利用特殊的关节点进行连接.如何根据家具模型的相应功能，自动分割提取出可变形的基元，优化关节连接，给出变形方案，并可用于真实制造，是功能驱动的机构设计的主要问题.

受霍伯曼球[90]启发，利用可自然伸展收缩的连杆结构或由连杆组成的剪刀结构的特性，可设计出节省空间、便于存放运输的家具.如 Zhang 等[43]和 Wang 等[44]的相关工作以及 Zheng 等[45]提出的交互设计系统.首先对基元进行预处理，即归纳定义不同类型的连杆、剪刀结构，参数化其运动形式，建立基本的数据集；然后在具体设计过程中，结合用户交互编辑，先提取出产品的几何形状图，再用基本的连杆、剪刀结构去逼近（如图 20 的沙发模型），通过不断优化拓扑结构、几何结构保证最终的形状能逼近给定的模型，并在整个伸缩变形过程中结构连续、各部分间无碰撞；最终获得可制造的产品（如图 20 的飞鸟模型）.通过探索不同形状的基元结构，如弯曲的连杆，进一步提高伸展性，从而节省空间.然而这类设计只是构建出物体的外部线轮廓，在实际应用中，更需要基于面和体的机构设计.



给定初始的几何模型，用户交互编辑其框架，系统自动优化连杆结构并实时显示其真实的缩放情形

图 20 基于连杆、剪刀结构的可收缩机构设计[45]

Fig.20 Retractable mechanism design based on linkage and scissor structures [45]

基于前人的工作，Koo 等[91]提出了一种允许模块缩放的折叠方法，并定义了图 21（a）中所示的 4 种关节连接各模块，可设计出如生活中的家具那样丰富的变形功能，然而它要求用户在设计过程中直接指定可折叠的模块，而且只考虑了相连模块间的碰撞检测.Li 等[46]提出的方法则可自动计算出需要折叠的模块，并自动检测变形过程中各模块及基元间的碰撞.该工作主要针对桌、椅、床这些可一块块组装的简单家具，首先给出可表达成一块块的家具模型，并指定其折叠的方向，而后提取物体的基本模块和可折叠模块（支架），再将支架分解为一系列折叠单元，并做优化调整（支架的大小、薄厚，折叠处

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的关节连接等)，最后分析给出折叠的顺序，用于生产制造.

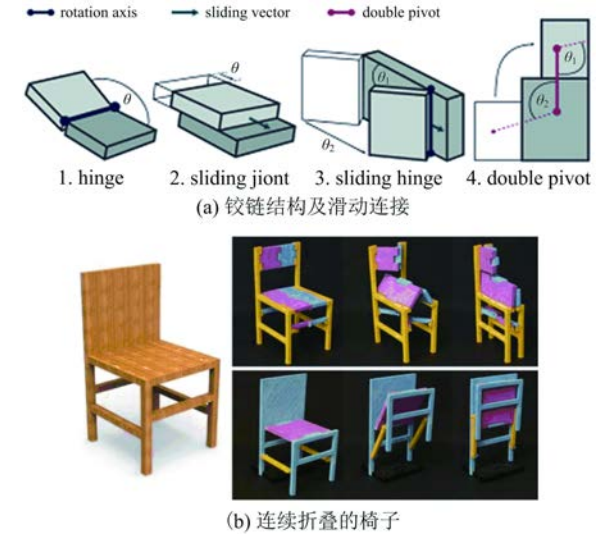
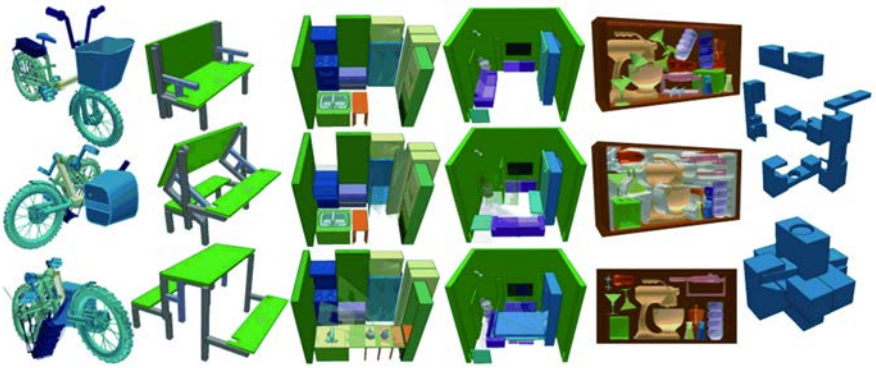


图 21　可折叠的家具机构设计[46]

Fig.21　Foldable furniture design[46]

5.2　多功能的机械结构设计

节省空间的机构设计在保证家具正常功能的前提下，尽量改变优化其拓扑、几何结构，使其节省空间，且家具的类型比较简单.而 Garg 等[47]则进一步对单个多功能家具或多个组合式家具做可计算分析设计，根据家具不同的功能和外观来配置各个部分，如图 22 中的自行车变化成摩托车的样子，长椅变换成桌子，厨房和卧室经过不同的布局拥有不一样的功能等.该工作的主要贡献是提供了更加便捷、直观的交互系统，基于时间轴，家具从初始的状态到最终的状态，用户可以通过设计各部分之间变换的顺序和方式，简单拖动调整家具的各个部分，并实时监测各部分间的碰撞，通过用户编辑，如调整几何形状、大小，切割掉多余部分，嵌入可旋转的关节等来解决碰撞问题.另外，在整个交互过程中，系统提供了如鬼影绘制、视角选择、局部放大等各种显示功能，辅助用户设计.虽然该系统十分便利，普通用户也能够很快设计出可配置各种功能的家具，但其物理可行性依据需要用户拥有丰富的专业知识和实际经验，所以很难用于实际设计制造.



通过变换各个部分的位置，重新配置，使得单个物体(如自行车、长椅)或多个物体(如厨房、卧室)拥有不同的功能和观赏性

图 22　多功能的机构设计[47]

Fig.22　Multi-functional mechanism design[47]

由于对功能的定义和量化分析工作并不多，其表达成相关机械结构的优化问题的过程也不直接，已有的工作也只是针对某一具体应用给出尽量合理的解决方案，并不能广泛推广，且各部件之间的连接情形比较单一，如铰链式、关节式连接.因而功能驱动的机械结构设计研究才刚刚开始.

6　结论与展望

动态物体结构设计研究历史十分悠久.不仅涉及材料学、机械学、力学、运动学、结构分析、设计艺术和制造工艺等专业领域的知识，还需要丰富的实际经验，这对一般用户而言十分困难.随着 3D 打印等新型制造工艺的出现，极大地推动了个人设计制造的发展.研究者们纷纷建立相应的模型，将传统的机构设计问题转化为“从运动到形式”的可计算的优化问题，来模仿设计者在设计过程中考虑的目标和约束条件，并进行求解，建立出面向一般用户的交互设计系统，规避繁琐复杂的设计过程.本文主要从三个尺度(微观、中观、宏观)介绍可计算的动态机构设计，分别对应材料结构设计、形状结构设计和机械结

特约评述

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 1 机械结构设计的基本构件类型

Tab.1 The basic component type of mechanical structure design

分类	方法 \ 构件类型	凸轮	滑轮	曲柄-滑块	齿轮	连杆	骨架-骨骼	铰链	剪刀结构
运动驱动	文献[28]	√	√	√	√			√	
	文献[29]				√	√		√	
	文献[30]		√		√	√			
	文献[31]					√			
	文献[32]					√			
	文献[34]					√			
	文献[35]						√	√	
	文献[36]					√			
形状驱动	文献[38]						√	√	
	文献[39]						√	√	
	文献[40]							√	
	文献[41]							√	
	文献[42]						√	√	
	文献[43]							√	√
功能驱动	文献[46]							√	
	文献[45]					√		√	√
	文献[47]							√	

构设计，并重点将宏观机械结构设计分为三类：运动驱动、形状驱动和功能驱动的机械结构设计.通常，运动驱动的机构设计需要基于各个构件的功能、力和运动的传导方式等先验知识，参数化建立基元数据集，用于优化系统输入，再利用这些数据集拟合用户指定的运动形式或路径，最后考虑无碰撞、轻质、简单拓扑等约束，优化各构件的种类、参数和空间位置，从而求解最优的设计方案；形状驱动的机构设计需要给定初始的形状模型和最终的变形结果，并对模型进行分割、连接、运动模拟、碰撞检测等处理，最后制造出可打印的产品；而功能驱动的机构设计同样需要定义其基元的类型，设计各部分的连接，并避免变形过程中的碰撞.从表 1 中罗列的相关工作依赖的基本机械构件类型可直观地看出，大多数工作用到的基元都比较单一，如何进行多种基元的合理组合并参数化以获得更加丰富的运动情形，仍是难题.

虽然，研究者们已经给出很多可计算机构设计系统，然而囿于真实情形的复杂性，准确描述机构的真实模型和求解都十分困难.已有的工作都无法加入更复杂的力学分析（如机械结构内部的力学传导等）、结构分析（如优化每一构件的结构来节省制造代价）和交互设计，大大影响了制造后的产品功能的丰富性以及其是否能正常运行，这些问题都有待进一步研究.本章将从以下几个方面讨论未来的研究方向.

6.1 数据驱动的机械结构设计

现实生活中有大量的动态机械结构，通过分析这些机械结构，分解提取基本的运动单元，扩大基元数据库，用于后期设计，建立成熟的数据驱动结构设计.以已有的宏观机构设计为例，虽然也基于分析基本结构单元，建立数据集用于后期应用，但系统依赖的数据集并不丰富.表 1 中总结了相关工作用到的基本结构单元，由此可看出，无论是基元的种类，还是其相互的组合类型都不丰富，未来最直接的工作就是扩充这些基本构件的种类，通过不同的组合方式，丰富运动类型，如分阶段的、非周期的运动.

数据驱动的机构设计除了可以扩充基本构件的种类与组合，还可以探索使用不同的电机组合，变依赖动力传导的“被动”运动为“主动”运动.如文献[33]中使用的“气动电机”和文献[35]中的“伺服电机”均可以产生变化的运动，二者结合，以产生行走、跳跃、下蹲、假摔等各种形式的运动.

最后，数据驱动的机构设计还可以考虑不同材料的使用，由“单质”到“多质”，并结合多尺度的结构进行设计.例如在刚性的铰链结构上包裹一层柔性材料，模拟人或动物的骨架与皮肤，利用力学传感器或形变传感器，结合文献[11]模拟“知觉”，并与非周期、多形态的运动结合起来，达到机械结构能自主与外部环境交互的目的，从而为最终设计出智能机器人打下基础.

6.2 实时交互的机械结构设计

从运动驱动的机构设计概述图（图 10）可以看出，除了可以扩充数据库，优化用户的交互也很重要.已有的交互系统大多基于二维草图绘制或是拖拽设计，未来可研究更加丰富、自由的交互工具，提供给用户更大的创造空间.例如用户可以直接编辑设计复杂的三维空间运动轨迹.另外，前面提到的与环境的交互设计，利用传感器或碰撞检测，使机构能根据所处环境的不同做出不同的应对行为，变得更加智能，这方面的研究工作也很有价值.

既然是交互设计，及时的系统反馈不仅有利于

特约评述

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

提高设计的效率，还影响了用户是否能设计出最优的机构.因此实时的交互设计研究是十分必要的.

6.3　基于复杂优化的机械结构设计

即使数据库十分庞大，交互的方式也丰富多样，若没有好的优化模型，系统依旧无法自动计算给出最优的机构设计.因而需要结合实际的物理性能，考虑复杂的力学、结构分析与优化.

(I) 力学优化.考虑运动过程中机械结构内部与外部更加复杂的力学情况，如摩擦力、压力、张力等，根据其实际运动效果优化微观、中观、宏观结构.考虑可能的偏差，设计出更加鲁棒的机械结构，避免由于制造过程中存在的误差，导致机械结构运行失败.

(II) 结构分析与优化.例如自动对各部分的结构进行力学分析，优化连杆的粗细、齿轮的薄厚等，用于制造更轻质的机械结构，同时节省材料、降低制造成本.

(III) 功能性优化.在完成基本满足用户期望的机构设计后，需考虑如何定义并量化机构的功能，然后进行优化的问题.例如节 5 中功能驱动的机构设计提到的“折叠”功能，可能一件家具的折叠方式有很多种，如何最佳地定义“折叠”功能的好坏，并量化分析，给出优化模型并求解是属于功能优化的问题之一.同理，如机构的外观美丑等语义特性是否也可以加入到优化中，这些问题都值得研究.

6.4　面向应用的机械结构设计

机械结构设计的最终目的是为了应用.在研究初中期，结合具体应用，给出某种合理巧妙的解决方案也十分有价值.例如节 5 中为了设计节省空间的家具而提出的可收缩、可折叠的机构设计;还可模仿机器人领域，制造出适应不同环境、满足某一功能的机构，如火灾、地震现场搜索遇难者的智能机器人等.随着制造工艺的快速发展，与新工艺相结合的应用设计也值得关注.

当然，满足实际情形的机构设计十分复杂，各个方向的研究存在耦合，这也是可计算交互式机械机构设计进一步研究的困难所在.但只要能找到相应的突破口，与相关领域的知识巧妙结合，其发展前景必定十分广阔.

参考文献(References)

[1] 刘利刚，徐文鹏，王伟明，等. 3D 打印中的几何计算研究进展[J]. 计算机学报，2015，38(6)：1243-1267.
LIU Ligang, XU Wenpeng, WANG Weiming, et al. Survey on geometric computing in 3D printing[J]. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(6): 1243-1267.

[2] 胡瑞珍，黄惠. 3D 打印启发下的模型实例化优化研究综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报，2015，27(6)：961-967.
HU Ruizhen, HUANG Hui. Recent Progress in 3D Printing Inspired Fabrication Optimization[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2015, 27(6): 961-967.

[3] 梅玉林. 拓扑优化的水平集方法及其在刚性结构、柔性机构和材料设计中的应用[D]. 大连: 大连理工大学，2003.

[4] 郭成，董伟，臧顺来，等. 弹性模量与塑性变形变化规律试验研究[J]. 锻压技术，2008，33(2)：116-119.
GUO Cheng, DONG Wei, ZANG Shunlai, et al. Experimental study on variation law of Young's modulus and plastic deformation[J]. Forging & Stamping Technology, 2008, 33(2): 116-119.

[5] BICKEL B, BÄCHER M, OTADUY M A, et al. Design and fabrication of materials with desired deformation behavior[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2010, 29(4): 63.

[6] SKOURAS M, THOMASZEWSKI B, BICKEL B, et al. Computational design of rubber balloons[J]. Computer Graphics Forum, 2012, 31: 835-844.

[7] SKOURAS M, THOMASZEWSKI B, COROS S, et al. Computational design of actuated deformable characters[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2013, 32(4): 82.

[8] CHEN X, ZHENG C, XU W, et al. An asymptotic numerical method for inverse elastic shape design[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2014, 33(4): 95.

[9] WANG B, WU L, YIN K K, et al. Deformation capture and modeling of soft objects[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2015, 34(4): 94.

[10] PANETTA J, ZHOU Q, MALOMO L, et al. Elastic textures for additive fabrication[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2015, 34(4): 135.

[11] SCHUMACHER C, BICKEL B, RYS J, et al. Microstructures to control elasticity in 3D printing[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2015, 34(4): 136.

[12] PIOVARČI M, LEVIN D I W, REBELLO J, et al. An interaction-aware, perceptual model for non-linear elastic objects[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2016, 35(4): 55.

[13] LOBONTIU N, PAINE J S N, GARCIA E, et al. Design of symmetric conic-section flexure hinges based on closed-form compliance equations[J]. Mechanism and

特约评述

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Machine Theory, 2002, 37(5): 477-498.

[14] YI B J, CHUNG G B, NA H Y, et al. Design and experiment of a 3-DOF parallel micromechanism utilizing flexure hinges [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2003, 19(4): 604-612.

[15] LOBONTIU N, GARCIA E. Two-axis flexure hinges with axially-collocated and symmetric notches [J]. Computers & Structures, 2003, 81(13): 1329-1341.

[16] CHEN G M, JIA J Y, LI Z W. On hybrid flexure hinges [C]//Proceedings of 2005 IEEE Networking, Sensing and Control. Piscataway: IEEE Press, 2005: 700-704.

[17] KYUNG J H, KO B G, HA Y H, et al. Design of a microgripper for micromanipulation of microcomponents using SMA wires and flexible hinges [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 141(1): 144-150.

[18] PEI X, YU J, ZONG G, et al. The modeling of cartwheel flexural hinges [J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(10): 1900-1909.

[19] TIAN Y, SHIRINZADEH B, ZHANG D. Closed-form compliance equations of filleted V-shaped flexure hinges for compliant mechanism design [J]. Precision Engineering, 2010, 34(3): 408-418.

[20] HAO X, CAI K, XU Z, et al. Design of flexible hinge of micro-vibration platform based on three-translational parallel mechanism [C]//2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. Piscataway: IEEE Press, 2010: 993-996.

[21] TIAN Y, SHIRINZADEH B, ZHANG D, et al. Three flexure hinges for compliant mechanism designs based on dimensionless graph analysis [J]. Precision Engineering, 2010, 34(1): 92-100.

[22] BELFIORE N P, VEROTTI M, CRESCENZI R, et al. Design, optimization and construction of MEMS-based micro grippers for cell manipulation [C]// 2013 International Conference on System Science and Engineering. Piscataway: IEEE Press, 2013: 105-110.

[23] LU Y. Rigidity analysis of elliptic flexible hinges [C]// 2013 2nd International Symposium on Instrumentation and Measurement, Sensor Network and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2013: 1064-1066.

[24] ZHU Z W, ZHOU X Q, WANG R Q, et al. A simple compliance modeling method for flexure hinges [J]. Science China Technological Sciences, 2015, 58(1): 56-63.

[25] XU Q. Design of a large-range compliant rotary micropositioning stage with angle and torque sensing [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(4): 2419-2430.

[26] VEROTTI M, CRESCENZI R, BALUCANI M, et al. MEMS-based conjugate surfaces flexure hinge [J]. Journal of Mechanical Design, 2015, 137(1): 012301.

[27] CAI K, TIAN Y, WANG F, et al. Development of a piezo-driven 3-DOF stage with T-shape flexible hinge mechanism [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 37: 125-138.

[28] ZHU L, XU W, SNYDER J, et al. Motion-guided mechanical toy modeling [J]. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(6): 127.

[29] COROS S, THOMASZEWSKI B, NORIS G, et al. Computational design of mechanical characters [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2013, 32(4): 83.

[30] CEYLAN D, LI W, MITRA N J, et al. Designing and fabricating mechanical automata from mocap sequences [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2013, 32(6): 186.

[31] MEGARO V, THOMASZEWSKI B, GAUGE D, et al. Chacra: An interactive design system for rapid character crafting [C]//Proceedings of the ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation. Aire-la-Ville, Switzerland: Eurographics Association, 2014: 123-130.

[32] THOMASZEWSKI B, COROS S, GAUGE D, et al. Computational design of linkage-based characters [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2014, 33(4): 64.

[33] ITOTANI Y, KIKUNO T, NIIYAMA R, et al. Scalable pneumatic actuator for easy creation of animated animal-shaped objects [C]//2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway: IEEE Press, 2015: 2489-2494.

[34] BHARAJ G, COROS S, THOMASZEWSKI B, et al. Computational design of walking automata [C]// Proceedings of the 14th ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation. New York: ACM, 2015: 93-100.

[35] MEGARO V, THOMASZEWSKI B, NITTI M, et al. Interactive design of 3D-printable robotic creatures [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2015, 34(6): 216.

[36] BÄCHER M, COROS S, THOMASZEWSKI B. LinkEdit: Interactive linkage editing using symbolic kinematics [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2015, 34(4): 99.

[37] COROS S. Creating animated characters for the physical world [J]. XRDS: Crossroads, The ACM Magazine for Students, 2016, 22(3): 32-37.

[38] CALÌ J, CALIAN D A, AMATI C, et al. 3D-printing of non-assembly, articulated models [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2012, 31(6): 130.

[39] BÄCHER M, BICKEL B, JAMES D L, et al. Fabricating articulated characters from skinned meshes [J]. ACM

特约评述

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Transactions on Graphics, 2012, 31(4): 47.

[40] ZHOU Y, SUEDA S, MATUSIK W, et al. Boxelization: folding 3D objects into boxes [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2014, 33(4): 71.

[41] SUN T, ZHENG C. Computational design of twisty joints and puzzles [J]. ACM Transactions on Graphics, 2015, 34(4): 101.

[42] HUANG Y J, CHAN S Y, LIN W C, et al. Making and animating transformable 3D models [J]. Computers & Graphics, 2016, 54: 127-134.

[43] ZHANG R, WANG S, CHEN X, et al. Designing planar deployable objects via scissor structures [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2016, 22(2): 1051-1062.

[44] 王士玮. 基于剪刀结构的动态形状设计与优化 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.

[45] ZHENG C, SUN T, CHEN X. Deployable 3D linkages with collision avoidance [C]//Proceedings of the ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation. Aire-la-Ville, Switzerland: Eurographics Association, 2016: 179-188.

[46] LI H, HU R, ALHASHIM I, et al. Foldabilizing furniture [J]. ACM Transactions on Graphics, 2015, 34(4): 90.

[47] GARG A, JACOBSON A, GRINSPUN E. Computational design of reconfigurables [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2016, 35(4): 90.

[48] BECKER M, TESCHNER M. Robust and Efficient Estimation of Elasticity Parameters using the linear Finite Element Method [C]//SimVis 2007. SimVis, 2007: 15-28.

[49] BICKEL B, BÄCHER M, OTADUY M A, et al. Capture and modeling of non-linear heterogeneous soft tissue [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2009, 28(3): 89.

[50] TERZOPOULOS D, PLATT J, BARR A, et al. Elastically deformable models [J]. ACM Siggraph Computer Graphics, 1987, 21(4): 205-214.

[51] WU X, DOWNES M S, GOKTEKIN T, et al. Adaptive nonlinear finite elements for deformable body simulation using dynamic progressive meshes [J]. Computer Graphics Forum, 2001, 20(3): 349-358.

[52] VOLINO P, MAGNENAT-THALMANN N, FAURE F. A simple approach to nonlinear tensile stiffness for accurate cloth simulation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2009, 28(4): 105.

[53] GRINSPUN E, HIRANI A N, DESBRUN M, et al. Discrete shells [C]//Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation. Aire-la-Ville, Switzerland: Eurographics Association, 2003: 62-67.

[54] BONET J, WOOD R D, MAHANEY J, et al. Finite element analysis of air supported membrane structures [J]. Computer Methods In Applied Mechanics And Engineering, 2000, 190(5): 579-595.

[55] MCINERNEY T, TERZOPOULOS D. A finite element model for 3d shape reconstruction and nonrigid motion tracking [C]// Proceedings of the Fourth International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 1993: 518-523.

[56] NEALEN A, MÜLLER M, KEISER R, et al. Physically based deformable models in computer graphics [J]. Computer Graphics Forum, 2006, 25(4): 809-836.

[57] BICKEL B, BÄCHER M, OTADUY M A, et al. Capture and modeling of non-linear heterogeneous soft tissue [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2009, 28(3): 89.

[58] MARTIN S, THOMASZEWSKI B, GRINSPUN E, et al. Example-based elastic materials [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2011, 30(4): 72.

[59] ZOHDI T I, WRIGGERS P. An Introduction To Computational Micromechanics [M]. New York: Springer Science & Business Media, 2008.

[60] DAMIL N, POTIER-FERRY M. A new method to compute perturbed bifurcations: application to the buckling of imperfect elastic structures [J]. International Journal of Engineering Science, 1990, 28(9): 943-957.

[61] COCHELIN B. A path-following technique via an asymptotic-numerical method [J]. Computers & Structures, 1994, 53(5): 1181-1192.

[62] BICKEL B, KAUFMANN P, SKOURAS M, et al. Physical face cloning [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2012, 31(4): 118.

[63] KHAREVYCH L, MULLEN P, OWHADI H, et al. Numerical coarsening of inhomogeneous elastic materials [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2009, 28(3): 51.

[64] NESME M, KRY P G, JEŘÁBKOVÁ L, et al. Preserving topology and elasticity for embedded deformable models [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2009, 28(3): 52.

[65] 刘虹. 有限变形螺旋弹簧非线性理论 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2004.

[66] 马静. 手表动力发条系统分析与改进设计 [D]. 天津: 天津大学, 2012.

[67] 李珂, 李浩. 扭矩测量设备中涡卷弹簧的有限元分析和鉴定 [J]. 科技通报, 2014, 30(7): 96-99.
LI Ke, LI Hao. Analysis and Appraisal of Spiral Spring Finite Element in Torque Tester [J]. Bulletin Of Science And Technology, 2014, 30(7): 96-99.

[68] 杨廷力. 机器人机械结构拓扑结构学 [M]. 北京: 机械

特约评述

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

工业出版社，2004.

[69] 高峰. 机构学研究现状与发展趋势的思考 [J]. 机械工程学报，2005，41(8)：3-17.
GAO Feng. Reflection on the current status and development strategy of mechanism research [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering，2005，41(8)：3-17.

[70] MITRA N J，YANG Y L，YAN D M，et al. Illustrating how mechanical assemblies work [J]. ACM Transactions on Graphics(TOG)，2010，29(4)：58.

[71] WAMPLER C W. Manipulator inverse kinematic solutions based on vector formulations and damped least-squares methods [J]. IEEE Transactions on Systems，Man，and Cybernetics，1986，16(1)：93-101.

[72] YU L F，YEUNG S K，TANG C K，et al. Make it home: automatic optimization of furniture arrangement [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG)，2011，30(4)：86.

[73] EITZ M，RICHTER R，BOUBEKEUR T，et al. Sketch-based shape retrieval [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG)，2012，31(4)：31.

[74] MARKS J，ANDALMAN B，BEARDSLEY P A，et al. Design galleries: A general approach to setting parameters for computer graphics and animation [C]//Proceedings of the 24th Annual Conference On Computer Graphics And Interactive Techniques. New York: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co，1997: 389-400.

[75] NIIYAMA R，RUS D，KIM S. Pouch motors: Printable/inflatable soft actuators for robotics [C]//2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE Press，2014: 6332-6337.

[76] HANSEN N. The CMA evolution strategy: A comparing review [M]//Towards a new evolutionary computation. Berlin：Springer，2006: 75-102.

[77] BROOKS S P，MORGAN B J T. Optimization using simulated annealing [J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician)，1995，44(2)：241-257.

[78] KALISIAK M，VAN DE PANNE M. RRT-blossom: RRT with a Local Flood-fill Behavior [C]// Proceedings of 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE Press，2006: 1237-1242.

[79] MADEN F，KORKMAZ K，AKGÜN Y. A review of planar scissor structural mechanisms: Geometric principles and design methods [J]. Architectural Science Review，2011，54(3)：246-257.

[80] DE TEMMERMAN N. Design and analysis of deployable bar structures for mobile architectural applications [D]. Brussels，Belgium：Vrije Universiteit Brussel，2007.

[81] BOTSCH M，PAULY M，GROSS M H，et al. PriMo: Coupled prisms for intuitive surface modeling [C]//Proceedings of the Fourth Eurographics Symposium on Geometry Processing. Aire-la-Ville，Switzerland：Eurographics Association，2006: 11-20.

[82] SEBASTIAN T B，KLEIN P N，KIMIA B B. On aligning curves [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence，2003，25(1)：116-125.

[83] POTTMANN H. Architectural geometry [M]. Exton，PA，USA: Bentley Institute Press，2007.

[84] LUO L，BARAN I，RUSINKIEWICZ S，et al. Chopper: Partitioning models into 3D-printable parts [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG)，2012，31(6)：129.

[85] LAU M，OHGAWARA A，MITANI J，et al. Converting 3D furniture models to fabricatable parts and connectors [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG)，2011，30(4)：85.

[86] UMETANI N，IGARASHI T，MITRA N J. Guided exploration of physically valid shapes for furniture design [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG)，2012，31(4)：86.

[87] SAUL G，LAU M，MITANI J，et al. SketchChair: an all-in-one chair design system for end users [C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Tangible，Embedded，and Embodied Interaction. New York：ACM，2011: 73-80.

[88] SCHMIDT R，RATTO M. Design-to-fabricate: Maker hardware requires maker software [J]. IEEE Computer Graphics and Applications，2013，33(6)：26-34.

[89] SCHULZ A，SHAMIR A，LEVIN D I W，et al. Design and fabrication by example [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG)，2014，33(4)：62.

[90] HOBERMAN C. Radial expansion/retraction truss structures: US5024031 A [P]. 1991-06-18 [2016-08-10]. https://www.google.com/patents/US5024031.

[91] KOO B，LI W，YAO J X，et al. Creating works-like prototypes of mechanical objects [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG)，2014，33(6)：217.

特约评述

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net