

触觉显示的人机交互研究及应用^{*}

喻耀华¹ 刘正捷¹ 孙弘进²

(大连海事大学计算机学院中国欧盟可用性研究中心 大连 116026)¹

(加拿大麦克马斯特大学心理学系 安大略省汉密尔顿市 L8S4K1)²

摘要 触觉显示是应用触觉刺激表示信息,通过触觉来显示和传递信息。首先介绍了触觉显示的研究背景,回顾了触觉显示的研究历史和国内外的研究现状,指出了触觉显示方面主要的研究领域。其次通过对现有的触觉显示的人机交互研究及应用所取得成果的分析,对当前触觉显示的人机交互研究及应用的发展进行了总结,最后对触觉显示的人机交互研究及其应用前景提出了一些展望,旨在帮助研究人员和工程师今后更好地研究、开发和利用触觉显示技术。

关键词 触觉显示,触觉界面,触觉图标,触觉反馈

Research and Application of Haptic Display in Man-machine Interaction

YU Yao-hua¹ LIU Zheng-jie¹ SUN Hong-jin²

(Sino European Usability Center, School of Computer, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)¹

(Department of Psychology, McMaster University, L8S 4K1 Hamilton, Ontario, Canada)²

Abstract Haptic display is the technology that communicates information through haptic stimulus. The research background, history and current status of haptic display were firstly introduced. The main research areas of haptic display were showed. Based on the analysis of the current research and application, the development trends about haptic display applying in man-machine interaction were described. Finally an overview of prospective development of this area was given.

Keywords Haptic display, Haptic interface, Tacton, Haptic feedback

1 研究背景

近年来计算机用户获得了越来越多的可以处理的信息,他们需要以一些适当的方式显示这些信息,进而理解并解释这些信息。触觉显示是通过触觉通道来显示和传达信息,就是应用触觉表示信息,实现信息传递。当视觉显示大小受限、不能或不适合进行视觉显示的时候,可以使用这种方式的信息表征来显示信息。通过刺激人体皮肤产生触觉感知,触觉显示由触觉通道为许多有视觉或听觉障碍的人提供一个重要的替代性的信息传递途径^[1,2]。

当前普遍使用的信息显示方法是利用人的视觉,将信息转换为文字、图形或图像在屏幕上显示出来。目前各种计算机和移动设备的用户界面大多采用图形用户界面,致使大量的信息必须通过视觉来获取,人们越来越依赖于视觉的结果导致了视觉的过载。因此,触觉显示的人机交互研究和应用具有很强的现实性和必要性,人们已经开始考虑利用触觉通道来开辟新途径,解决人机交互的问题。本文的目的是帮助研究人员和工程师今后更好地研究、开发和利用触觉显示技术。

2 研究历史及现状

触觉显示技术研究在 18 世纪初就已开始,但至今所取得

的成就却非常有限,很多领域仍需进一步深入研究^[3]。触觉技术研究是当前的研究前沿和重点,国际上有专门的学会组织,经常性的学术研讨会每年多达数十个。与国外相比,国内在触觉领域仍属于小范围的个别研究,在规模和深度上都存在较大差距。国内在触觉技术领域做出贡献的研究机构主要包括东南大学、北京航空航天大学、中国科学院合肥智能机械研究所、清华大学、西安交通大学、哈尔滨工业大学、杭州电子科技大学、北京理工大学、北京自动化所、沈阳自动化所和河北工业大学等^[3]。触觉显示是一个研究热点,近年来国内外在触觉显示方面主要对如下领域进行研究:(1)虚拟物体的触觉建模研究;(2)触觉显示的人机交互研究;(3)人的触觉心理和生理特性研究。

人的触觉系统不同于视觉和听觉,但它能和视听觉信号同时被感知,并具有和听觉一样的全方向的感觉能力。对人类获取信息能力的研究表明,触觉是除视觉和听觉之外最重要的感觉,当机器人与环境相互作用时,比如组装工件、插销入孔等,如果仅仅提供视觉图像信息,操作者不能从中获得真实的感受^[4]。遥操作和虚拟操作的研究还表明,触觉信息的反馈可以极大提高精细作业任务的效率和精度。如对插销入孔操作的对比实验表明,提供操作者触觉反馈信息比仅有图像显示可以使任务完成时间缩短近一半^[4,5]。有人已提出将触觉显示用作虚拟环境或虚拟现实应用系统的界面^[6,7],用

^{*}基金项目:欧盟第 5 框架研发计划和国家中欧科技合作计划项目(IST-1999-29067)资助。喻耀华 讲师,博士研究生,主要研究领域为人机交互、交互系统设计、可用性工程;刘正捷 教授,博导,主要研究领域为人机交互、可用性工程;孙弘进 教授,博导,主要研究领域为心理学、神经生理学、计算机科学。

作遥操作的反馈,用作信息视觉呈现的一种补充或替代,用作移动环境下触觉方式的信息传达^[8]。

3 触觉显示的人机交互研究及应用

人们与物体交互得到的触觉信息可以分为两种:一种是表面的信息,主要是指通过皮肤与物体接触所感受到的各种信息(接触反馈);另一种是肌肉运动知觉的信息,是指通过四肢的位置和运动所产生的力量来得到的信息(力反馈)^[9]。接触反馈是指人与物体对象接触所得到的全部感觉,是摸觉、压觉、震动觉、刺痛觉等皮肤感觉的统称,反映了接触的感觉。力反馈是在肌肉、关节和韧带等受到拉伸、压缩或扭曲时而到的受力感知,感知的是物体重量、冲力和运动等。一般来说,人们所获得的信息是这两种信息的混和。我们所接触的物体表面的纹理、软硬、形状是通过皮肤所产生的表面信息所提供的,而物体的粗糙度、弹性等特征是通过手和手臂的运动所产生的运动知觉信息所提供的^[9]。

皮肤感觉在计算机界面中没有被利用,但是众所周知它是一个有效信息传递通道。例如 Tahoma 方法被盲哑人使用,这表明单独皮肤感觉也可以被用来传达复杂的信息,比如语言。触觉显示并不是新东西,但它们没有受到 HCI 研究者太多的注意,因为它们经常是为非常特殊的应用而做的工程原型和设计。它们已经被应用在远程操作或显示提供给盲人用户以替代视觉。触觉显示现在正以一种可以很容易地使用的方式而逐渐具备实用性。

3.1 触觉界面

人们研究在人机交互系统中应用触觉界面已经有较长的一段时间,主要有以下一些领域:(1)遥操作、虚拟环境、虚拟现实和临场感;(2)感官替代;(3)研究不同触觉参数的实验原型;(4)三维表面生成;(5)Braille 系统;(6)游戏。

使用可更新的盲文显示系统、盲文阅读器和触觉鼠标可以让盲人用户阅读计算机屏幕和获得基于文本的信息^[10-12]。触觉鼠标通过给用户指尖提供触觉反馈使盲人或视力受损的用户可以在计算机屏幕上导航,识别图形、文本和图片等。

英国格拉斯哥大学的 Brewster 等人提出了 Tacton 的概念^[13],介绍了一种新的触觉输出形式。Tactons(或称触觉图标)是结构化的、抽象的触觉信息,可以用作信息显示,可以用来替代视觉传递信息。它们是视觉图标和听觉耳标的触觉对应物。它们能被用在计算机用户界面上替代视觉图标、听觉的听标和耳标,或与它们结合使用。但很少人知道如何有效设计实现它们。有多种不同参数可用于 Tactons 构建,包括频率、振幅和脉冲持续时间,加上其它参数如节奏和位置。在各种不同情况下,Tactons 具有很大的改善人机交互的潜力,尤其是在视觉显示超负荷、视觉显示大小受限、不适合或不能进行视觉显示时,如盲人使用的界面、手机界面和穿戴式电脑应用上。他们介绍了用来构建 Tactons 的参数和其中的一些可能用来设计 Tactons 的方式,并给出了在用户界面上的哪些地方 Tactons 被证明有用的例子。

Brown, Brewster 和 Purchase 等人研究调查了用户对 Tactons 的感知和识别情况^[14],他们做了两个关于 Tactons 的实验:第一个实验探讨了用震动触觉粗糙度做 Tactons 的感知情况,这个粗糙度是用振幅调制的正弦波来创建的。结果表明,粗糙度可以作为一个参数来构建 Tactons。第二个实验是全面地评估 Tactons,使用了在第一个实验中的三种粗糙度,另外结合三种震动节奏创建了一套 Tactons,采用两个

不同震动触觉参数(节奏和粗糙度)在两个维度上编码表示信息。这次实验的结果显示 Tactons 可以作为一个成功的在用户界面传递信息的方式,这一套 Tactons 整体识别率达 71%,节奏的识别率是 93%,表面粗糙度的识别率是 80%。当需要编码更多维度的信息时,就需要扩展这些 Tactons 的参数空间。因此,他们又进行了一些研究,利用空间定位为参数编码信息的第三个维度,调查这种情况下 Tactons 的识别率^[15]。研究结果表明,采用 3 种不同震动触觉参数(节奏、空间定位和粗糙度)在信息的三个维度上编码进行信息显示,发现识别率只有 48%。不过,通过减少参数等级的个数,即将粗糙度的等级个数由 3 个减少到 2 个,可将 Tactons 的识别率提高到 81%。这些结果将帮助设计者在触觉显示设计时选择使用合适的 Tactons。

进度条是一个计算机常见的人机界面元素。进度条也出现在移动电话或 MP3 播放器上,用来指示网页下载或图片或声音文件的转移转换等。当拷贝文件、转换文件或下载文件时,经常使用进度条来表达过程进度,但它要与其它视觉任务竞争屏幕空间和视觉注意。Brewster 和 King 研究了用 Tactons 来表示过程进度信息^[16],他们创建了一个触觉显示的进度指示器,将进度信息编码成一系列震动触觉脉冲。将触觉进度指示器与标准视觉指示器做了一个对比实验,结果表明,触觉显示进度指示器在用户绩效上有明显的提高,并且用户喜欢使用触觉显示的进度指示器。

Toney 等人在一个垫肩里集成了一个震动触觉显示,促进了震动触觉显示在穿戴式设备中的使用^[17,18]。由于震动设备的脉冲和形状的大小范围可以非常方便地集成到小的衣服空间里,因此震动可以作为一个基于插入到衣服里的触觉显示的合适选择。此外,Tsukada 等人提出了一种称为“Active-Belt”的可穿戴式界面,它能使用户通过震动激活的触觉感官获得多种方向信息^[17,19]。Watanabe 等人开发了一种触觉装置,这种装置能控制表面粗糙度的触觉感^[20]。该装置通过应用振幅几微米的表面超声震动产生一个平滑的触觉感受。

Tokyo Metropolitan Institute of Technology 的 Yasushi Ikei 等人研制了基于振动的触觉显示方式^[21,22]。该触觉显示系统通过针型接触阵列实现,由直径 0.5 mm 的钢琴线排列成 5×10 的接触阵列,分布于 2 mm 厚的橡皮膜上。针的振动频率为 250 Hz,即人皮肤能感觉到的最大的振动频率,采用压电激励方式驱动针跳动,并控制它的位移。针振动的振幅随着虚拟物体表面状况和手指放置在显示窗口二维位置的变化而变化。使用者在桌面上移动鼠标,模拟虚拟环境中手指接触虚拟物体表面的情况,控制针振动的强度,手指就能感受到虚拟物体表面状况和纹理信息。

力反馈运用先进的传感技术将虚拟物体的空间运动转变成操作者周边物理设备的机械运动,使用户能体验到真实的力度感和方向感,从而提供一个崭新的人机交互界面。近几年来,力反馈技术在电脑游戏中的应用方兴未艾,创造了具有革命性的人机交互游戏界面。清华同方针对某些 3D 赛车游戏,开发出了力反馈方向盘 R440。它采用 Immersion 公司的专利——TouchSense,将游戏的相关数据转化为有强弱之分且有方向变化的反作用力,使用户感受引擎震动、撞车及换挡等各种虚拟力,令游戏者仿佛身临其境^[9]。

Moose 是由斯坦福大学于 1998 年研制的一个具有 2-DOF 的力反馈装置。它定义了一个带有力反馈的 Window

窗口,在拖放边框、滚动条以及其他屏幕组件时能够明显感觉到装置产生的作用力^[23,24]。Immersion公司生产的Logitech Wingman鼠标也与带力反馈的Window视窗具有类似的功能,适合于盲人的网页浏览^[23]。Magnusson等人正在利用PHANTOM装置以及VRML语言建立一个带力反馈的人机交互界面,帮助盲人感知3D表面。

3.2 触觉反馈

现在已经有由Immersion公司生产的数据手套Cryber-Touch,可以为手指和手掌提供震动触觉^[25]。CyberForce能够为操作者整个手和手臂提供力反馈信息,数据手套Cyber-Grasp可以提供5个手指抓取物体的力反馈。这些设备适合于需要将震动触觉和力反馈结合到虚拟现实和遥操作系统的人机交互中,可以自然的方式进行人机交互以增强沉浸感和真实感,提高任务的执行效率和成功率。SensAble科技公司的PHANTOM系列触觉交互设备能使用户接触并操作虚拟物体^[26],不同的PHANTOM产品系列分别适合于从事不同研究领域或商业需求的用户。PHANTOM作为一种高精度的触觉交互设备,可以提供非常大的工作空间和反馈力,以及六自由度的运动能力。PHANTOM是典型的单点触觉交互设备,通过具有六自由度操作终端与人的指尖进行点交互。除此之外,还有力反馈操纵杆、力反馈鼠标、驱动轮等设备也可用于人机交互。

已经有一些好的使用触觉反馈改进台式机界面的研究。这些研究显示触觉反馈可以改进用户使用鼠标时的交互。Stephen Brewster, Faraz Chohan和Lorna Brown进行了一项研究^[27],调查震动触觉反馈在掌上电脑触屏键盘方面的使用。这种键盘在移动的场景下很难使用,因为按键很小。他们进行了实验室研究,比较标准按钮与增加了触觉反馈的按钮。结果显示,随着触觉反馈用户键入明显更多的文字,很少出现错误,并更多地纠正了所犯的错误。然后他们又做了另一个研究,让用户坐在地铁上,看这些积极的效果是否会转移到真实的使用中。结果是,增加触觉反馈较少有益的效果,只是错误被纠正的数量明显增加了。然而,他们发现用户具有强烈的主观反馈喜欢这种触觉显示。该结果表明,触觉反馈在改善用户与触摸屏的交互中可以发挥重要的作用。

在PDA等数码设备上触摸屏已经很普遍了。触摸屏通过结合显示和输入空间节省移动设备的空间,因此很有吸引力。Poupyrev等人对使用在小触摸屏上的触觉显示界面进行了设计、实现和非正式评估^[28],他们把一个触觉设备嵌入在Sony PDA的触摸屏,并通过该触觉设备产生触觉信息,增强基本的GUI控件的使用。当用户按屏幕上的控件时,不用观察界面控件的反应,手指即可以接收到触觉反馈,从而感觉到那些界面控件的反应。在非正式的评估中,这种触觉反馈很受用户的欢迎。事实上,触觉是一个较好的反馈通道,它比视觉快5倍。他们相信,通过触觉反馈增强GUI可以更有效和更舒适地使用移动设备。它能够补充声音和视觉的效果,加强了触摸屏交互的物理实在感和直接性的特征,使得GUI控件更真实。他们相信,触觉反馈将成为触摸屏界面设计的将来,并且是未来移动设备的标准特征。

Cockburn等人研究探讨了多通道反馈在图形用户界面中如何促进小目标的拾取^[29],分析了非语音声音、触觉反馈和伪触觉的粘着性反馈三种反馈方式的所有组合。触觉反馈是通过震动(而非力反馈)产生兴奋,粘着性是通过当光标进入目标的时候实行动态重构鼠标控制显示增益来实现的。结

果表明,对于小的、离散分布的目标,所有反馈方式都能减少拾取目标的时间,粘着性反馈则提供了更大的优势。此外,粘着性反馈和触觉反馈似乎结合得很好。然而,更加生动的菜单选择任务的结果显示使用多种反馈的时候需要谨慎,过度反馈会通过干扰邻近目标拾取的噪音而有损用户的交互过程。今后的研究工作需要探讨在离散目标成功拾取的多通道反馈和干扰邻近的目标选择的分心反馈之间的边界条件。

Erp等人在一个驾驶模拟器中测试一个震动触觉显示设备^[17,30],该设备有8个震动部件或触觉致动器安装在驾驶员的座位上。与视觉显示相比,以视觉、触觉和多通道导航显示进行驾驶的用户,其测试结果表明触觉导航显示减轻了驾驶员的工作负荷,尤其是在高工作负荷的情况下。多通道显示时驾驶员的反应速度最快。局部的震动或轻拍是表达方向信息的一种直观的方式。利用触觉通道可以释放其它高负荷的感觉通道,较大地提升安全性。他们已经考虑在飞机驾驶座舱里使用震动触觉显示^[31]。

Lindeman等人介绍了在身体躯干使用震动触觉提示,作为一种提高用户空间任务绩效的方式^[17,32]。用在用户的躯干周围8个均匀分隔排列的罗盘方位点上放置触觉致动器来产生震动触觉刺激。每个用户在自己身体相应位置分别放置这些触觉致动器,并用一条氯丁橡胶带固定住触觉致动器,形成“TactaBelt”。触觉致动器在3.0V以142Hz的频率震动,产生0.85G的震动量。在一个大楼清理活动中,使用方向的震动触觉提示来通知用户去发现大楼内还未清理的区域。对比使用和不使用震动触觉提示,当给予附加震动触觉提示时,用户可以清理更多的区域。当震动触觉提示存在时,每次发现未清理区域的时间也更短。

3.3 图形的触觉显示

访问数字化存储的数值数据资料对视障人士目前还非常受限。图表和可视化常常用来分析数值数据之间的关系,但目前访问这些数据的方法是高度以视觉作为媒介的。使用声音反馈表达数据是一种较常见的数据访问方法,更容易取得数据资料,但导航和访问数据的方式本质上往往是串行的和比较吃力的。可以利用触觉显示为视障用户提供额外的反馈来支持点击式交互。英国格拉斯哥大学的Wall等人对视障计算机用户进行的需求调研引出了对当前可达性技术的综合评述^[33],提出了使用触觉反馈辅助导航的指导原则,还定性评估了一个原型界面。评估结果显示,提供一个绝对位置输入设备及触觉反馈可以使用户利用触觉和本体感受的提示,在某种程度上类似于点击技术,可以用来探查图形,获取数据信息。

有一类图形图像的力觉表达系统主要借助力觉再现装置产生力反馈,引导盲人感知物体的轮廓^[23,34]。类似的系统还有意大利LAR-DEIS实验室研制的VIDET(VisualDecode by Touch)系统。Yu Wai等人通过对比实验证明,利用力反馈装置提供的主动作用力以及摩擦阻力,能够明显改善盲人对图表数据的感知能力^[35]。目前,国外很多研究者都在研究基于力反馈的图形图像表达。Fritz和Barner等人研究如何利用三维力反馈装置(如PHANTOM)表达数学模型和复杂图表。此类研究都是通过力反馈装置,主动引导盲人,帮助盲人感知物体边缘信息。日本Tsukuba大学的Hiroo Iwata等人也开发了一套基于二维力反馈装置的3D物体轮廓显示系统Feelex。它能够根据摄像头拍摄的图片,重构3D物体轮廓,模拟与柔性物体表面相接触的效果^[23]。SmartTouch系统将

传感器获得的视觉图像转换成触觉信息并通过电刺激用户指尖显示^[36],由于该系统便于通过触觉识别印刷材料,它可以被视障人士用作盲文显示。

McGookin 等人进行了一个叫 Multivis 的研究项目^[37],该研究的目的是让视障人士可以有效地构建和浏览数学图形。他们探讨了目前技术的一些问题,通过视障人士获取和了解了他们的需求,利用触觉技术来帮助视障人士查看图形,研究了新型的辅助工具 Graph Builder 和 Sound Bar。Graph Builder 让视障用户能交互地创建简单图形,这在教育过程中是很重要的,Sound Bar 提供视障人士快速概览和查看条形图。通过提供诸如这些应用,总的来说可以让视障用户更好地与图形交互,更好地了解图形,并最终能够更好地学习和了解数学。Graph Builder 让视障人士可以构建数学图表,并能让这些图表永久保留、浏览和修改。他们探讨了这种交互构建技术的局限^[38],解释了为什么在教育领域这种交互构建是重要的。他们还对 Graph Builder 进行了评估。显示用户可准确地建构图形,但是当多个条形图中有一个条形图过高或过低时,有较多的错误发生。修改操作条形图的机制,并进一步增加非语音的声音反馈,再次的评估结果显示发生错误的比例减少了。

结束语 触觉显示的人机交互研究与人机交互、触觉心理和生理特性研究等方面的研究进展是密切相关的。未来触觉显示的人机交互应用前景很好,但还需要根据不同的应用领域与知识背景进行大量的研究和实验。比如目前对触觉的感知特性缺乏深入认识,研究者只定性分析出一些影响触觉感知的物理因素,如触觉刺激类型、刺激的频率以及空间分布和作用力的方向等,还无法准确给出触觉感知与这些因素之间的关系模型^[23]。触觉显示的人机交互研究还需要研究探讨可能的应用途径和各种参数,以及界面元素、操作(或者交互)与参数的各种映射关系,以便设计师做出恰当的设计,人们在面对触觉显示时才能更容易地感知信息。

参 考 文 献

- [1] Asamura N, Yokoyama N, Shinoda H. A method of selective stimulation to epidermal skin receptors for realistic touch feedback[C]//Proceedings IEEE Virtual Reality Conference. 1999; 274-181
- [2] Maeno T, Kobayashi K, Yamazaki N. Relationship between the structure of human finger tissue and the location of tactile receptors[J]. Bulletin of JSME International, 1998, 41(1):94-100
- [3] 帅立国,姜昌金,周芝庭,等. 触觉显示技术及其发展趋势[J]. 工业仪表与自动化装置, 2006, 6:74-79
- [4] 王爱民,戴金桥. 人机交互中的力/触觉设备进展综述[J]. 工业仪表与自动化装置, 2007, 2:14-18
- [5] Cui Zhenglie, Katsuya M, Kazunori S. The effect of reaction force feedback on object-insertwork in virtual reality environment[R]. Research Reports on Information Science and Electrical Engineering of Kyushu University, 2002, 7(2): 105-110
- [6] Bolanowski S J, Gescheider G A, Verrillo R T, et al. Four channels mediate the mechanical aspects of touch[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1988, 84(5):1680-1694
- [7] Bolanowski S, Gescheider G, Verrillo R. Hairy skin: psychophysical channels and their physiological substrates[J]. Somatosensory and Motor Research, 1994, 11(3):279-290
- [8] Summers I R, Cooper P G, Wright P, et al. Information from time-varying vibrotactile stimuli[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1997, 102 (6):3686-3696
- [9] 李洋. 基于力反馈技术的虚拟产品开发研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2006
- [10] Chouvardas V G, Miliou A N, Miltiadis K. Hatalis, Tactile Display Applications: A state of the arts survey[C]//2nd Balkan Conference in Informatics, BCI2005. Ohrid, FYROM, November 2005
- [11] Hughes R G, Forrest AR. Perceptualisation using a tactile mouse//Proceedings of the 7th Conference on Visualization '96. Los Alamitos, CA, USA; IEEE Computer Society Press, 1996:181-188
- [12] Shimizu Y, Shinohara M, Nagaoka H, et al. Improvement of user interface for blind pc users//Miesenberger K, Klaus J, W. Z, eds. ICCHP 2002, LNCS 2398. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2002:540-542
- [13] Brewster S A, Brown L M. Tactons: Structured Tactile Messages for Non-Visual Information Display[C]//Proceedings of Australasian User Interface Conference 2004. Dunedin, New Zealand, Australian Computer Society, 2004:15-23
- [14] Brown L M, Brewster S A, Purchase H C. A First Investigation into the Effectiveness of Tactons[C]//Proc. World Haptics 2005. IEEE Press, 2005:167-176
- [15] Brown L M, Brewster S A, Purchase H C. Multidimensional Tactons for Non-Visual Information Display in Mobile Devices [C]//Proceedings of MobileHCI. Espoo, Finland, 2006
- [16] Brewster S A, King A. The Design and Evaluation of a Vibrotactile Progress Bar[C]//Proceedings of WorldHaptics 2005 Pisa. Italy; IEEE Press, 2005:499-500
- [17] Chouvardas V G, et al. Tactile displays: Overview and recent advances[C]. Displays (2007), doi:10.1016/j.displa.2007.07.003
- [18] Toney A, Dunne L, Thomas B H, et al. A shoulder pad insert vibrotactile display[C]//Proceedings of the Seventh IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC03). 2003:35-44
- [19] Tsukada K, Yasumura M. Activebelt: belt-type wearable tactile display for directional navigation[J]. Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag GmbH, 2004, 3205: 384-399
- [20] Watanabe T, Fukui S. A method for controlling tactile sensation of surface roughness using ultrasonic vibration[C]//Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1995
- [21] Ikei Y, Wakamatsu K, Fukuda S. Vibratory tactile display of image-based textures[J]. Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2003:53-61
- [22] 陈旭,宋爱国. 纹理触觉再现技术的研究现状及发展[J]. 工业仪表与自动化装置, 2006, 3:72-74
- [23] 吴涓,宋爱国,李建清. 图像的力/触觉表达技术研究综述[J]. 计算机应用研究, 2007, 24(5):1-3
- [24] Sal I K. Introduction to haptics [EB/OL]. [2006-04-15]. <http://hci.stanford.edu/seminar/abstracts/99200/9909242salisbury.html>
- [25] Immersion Corporation, 3D Interaction [EB/OL]. [2007-11-15]. <http://www.immersion.com/3d>
- [26] Sensable Technologies, PHANTOM Omni 触觉交互设备性能 [EB/OL]. [2007-11-15]. http://www.sensable.com/documents/documents/PHANTOM_Omni_Spec_Chinese.pdf

并行计算机系统具有巨大的处理能力,为了充分利用这种能力,需要优良的负载分配方案。负载分配是并行计算机系统的资源管理模块,它主要是合理和透明地在处理机之间重新分配系统负载,以使系统的综合性能达到最优。在文献[1]中已经提到,并行系统的路由算法的优劣与互连结构的性质的好坏有密切的联系,我们不能孤立研究它们。同样,并行系统的负载分配方案的优劣也与互连结构的性质的好坏有直接的关系。我们应该统一处理互连结构、路由算法和负载分配问题。

在现今负载分配的研究中大量使用了近代代数图论的方法,如图的 Laplacian 矩阵和最优化方法,如规划论等^[16],因此代数图论和规划论方法在负载分配研究中是大有用武之地的。但因为它的固有的复杂性,还没有一个统一的理论。因此我们应进一步深入研究负载分配研究中的代数图论和最优化方法。我们前面已经谈到,Cayley 图和陪集图是一个优良的互连结构模型,将以这个模型为框架,进行负载分配方案的研究。

结束语 综上所述,在一个优良的并行计算机互连结构模型——陪集图的框架下,深入运用现代代数图论和最优化方法,统一处理并行计算机互连结构、路由算法和负载分配问题,以求推进它们的一般数学方法。系统深入地运用近代代数、图论和最优化方法,特别是图对称性、图同态、Laplacian 矩阵和规划论,在一种优良的互连结构模型——陪集图的框架下,统一处理并行计算机重要的互连结构、路由算法和负载分配问题,从而为推进统一的数学方法作出贡献。

参 考 文 献

[1] El - Rewini H , El - Barr M A . Advanced Computer Architecture and Parallel Processing. Wiley-Interscience, 2005
 [2] Dally W J , Towles B P . Principles and Practices of Interconnection Networks. Morgan Kaufmann, 2004
 [3] Grama A , et al . Introduction to Parallel Computing, Second Edition. Pearson Education Limited, 2003
 [4] 陈国良 . 并行计算——结构、算法、编程. 高等教育出版社, 2001
 [5] Heydemann M . Cayley Graphs and Interconnection Networks. Graph Symmetry: Algebraic Methods and Applications, 1997: 167-224

[6] Chen Baoxing, Xiao Wenjun, Parhami B. Internode distance and optimal routing in a class of alternating group networks. IEEE Transactions on Computers, 2006, 55(12):1645-1648
 [7] Xiao Wenjun , Parhami B . Further mathematical properties of Cayley digraphs applied to hexagonal and honeycomb meshes. Discrete Applied Math. , 2007, 155(13):1752-1760
 [8] Xiao Wenjun, Parhami B. Some mathematical properties of Cayley digraphs with applications to interconnection network design. International Journal Computer Math. , 2005, 85(5): 521-528
 [9] Xiao Wenjun, Parhami B. A group construction method with applications to deriving pruned interconnection networks. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2007, 18(5): 637-643
 [10] Xiao Wenjun , Parhami B . Structural Properties of Cayley Digraphs with Applications to Mesh and Pruned Torus Interconnection Networks. Journal of Computer and System Sciences, 2007, 73:1232-1239
 [11] Elsasser R, Monien B, Schamberger S. Load Balancing in Dynamic Networks // Proc. of the 7th International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks. 2004:1-8
 [12] Antonis K, et al. A hierarchical adaptive distributed algorithm for load balancing. J. Parallel and Distributed Computing, 2004, 64:151-162
 [13] Devine K D, et al. New challenges in dynamic load balancing. Applied Numerical Math. , 2005, 52(2/3):133-152
 [14] Rotaru T, Nageli H H. Dynamic load balancing by diffusion in heterogeneous systems. Parallel and Distributed Computing, 2004, 64:481-497
 [15] Arndt H. On finite dimension exchange algorithms. Linear Algebra and its Applications, 2004, 380:73-93
 [16] Berenbrink P, et al. Dynamic diffusion load balancing // Lecture Notes in Computer Science, 3580. 2005:1386-1398
 [17] Dolev S, et al. Dynamic load balancing with group communication. Theoretical Computer Science, 2006, 369 (1/3):348-360
 [18] Zhao Chenggui , Xiao Wenjun , Qin Yong . Hybrid Diffusion Schemes for Load Balancing on OTIS-Networks // Lecture Notes in Computer Science 4494. 2007:421-432

(上接第 31 页)

[27] Brewster S , Chohan F , Brown L . Tactile Feedback for Mobile Interactions[C] // CHI 2007 Proceeding. San Jose, California, USA, 2007
 [28] Poupyrev I , Maruyama S . Tactile Interfaces for Small Touch Screens[C] // Proc. of UIST 2003. ACM Press, 2003:217-220
 [29] Cockburn A, Brewster S A. Multimodal feedback for the acquisition of small targets[J]. Ergonomics, 2005, 48(9):1129-1150
 [30] Erp J B V , Veen H A V . Vibrotactile in-vehicle navigation system. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2004, 7(4/5):247-256
 [31] van Veen H A H C , van Erp J B F . Tactile information presentation in the cockpit [J]. Lecture Notes in Computer Science 2058. 2001(3118):174-181
 [32] Lindeman R W , Sibert J L , Mendez-Mendez E , et al . Effectiveness of directional vibrotactile cuing on a building-clearing task [C] // CHI'05: Proceeding of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York, NY, USA: ACM Press, 2005:271-280
 [33] Wall S, Brewster S A. Feeling What You Hear: Tactile Feed-

back for Navigation of Audio Graphs[C] // Proceedings of ACM CHI 2006. Montreal, Canada: ACM Press Addison-Wesley, 2006:1123-1132
 [34] YU Wai , Kangas K , Brewster S . Web-based haptic applications for blind people to create virtual graphs // Proceeding of the 11th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator System[C]. Los Angeles, 2003: 318-324
 [35] YU Wai , Ramloll R , Brewster S . Haptic graphs for blind computer users: Human-Computer Interaction Workshop [C]. Glasgow, 2000: 41-51
 [36] Kajimoto H , Kawakami N , Tachi S , et al . Smarttouch: Electric skin to touch the untouchable[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2004, 24(1):36-43
 [37] McGookin D K , Brewster S A . MultiVis : Improving Access to Visualisations for Visually Impaired People[C] // Vol II Proceedings of ACM CHI 2006 (Montreal, Canada). ACM Press, 2006:267-270
 [38] McGookin D K , Brewster S A . Graph Builder : Constructing Non-visual Visualizations[C] // Proceedings of the 20th BCS HCI Group Conference. London, UK, 2006