

基于球面调和函数与距离场的柔性体碰撞检测方法

方艳红¹, 吴斌¹, 杨正宜²

1. 西南科技大学信息工程学院特殊环境机器人技术四川省重点实验室, 四川绵阳 621010
2. 澳大利亚昆士兰大学先进成像中心, 澳大利亚布里斯班 4072

摘要 针对虚拟现实环境中柔性体碰撞检测实现的复杂性, 提出一种基于球面调和函数(SH)的柔性体距离场碰撞检测方法。该方法利用SH的多尺度特性实现柔性体距离场的快速建立, 依据距离场碰撞检测方法实现交互工具与虚拟柔性体的快速碰撞检测, 并沿着距离的梯度方向进行柔性碰撞响应的快速估计。结果表明, 相对于传统的距离场碰撞检测算法, 该方法可大大节省内存占用量并有效实现交互工具与柔性体的碰撞检测, 碰撞检测时间在毫秒级范围内, 满足柔性体碰撞检测的实时性要求。

关键词 力触觉交互; 碰撞检测; 球面调和函数; 距离场

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.34.004

A Method of Soft Object Collision Detection Based on Spherical and Distance Fields

FANG Yanhong¹, WU Bin¹, YANG Zhengyi²

1. Special Environment Robot Technology Key Laboratory of Sichuan Province, Faculty of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan Province, China
2. Centre for Advanced Imaging, University of Queensland, St Lucia, Brisbane, Queensland 4072, Australia

Abstract This paper presents a novel method of real-time collision detection in virtual environments based on spherical harmonics and distance fields. Fundamentals of spherical harmonics modeling virtual object are initially proposed for representing complex objects with different degrees of spherical harmonics in the spherical coordinate system. Distances between virtual objects and space mesh are then projected onto the spherical surface to generate a distance map. Approximate collision detection is performed at the low scale, while accurate detection is performed at the high scale. Experimental results show that computational complexities and memory requirements are reduced significantly compared with those encountered in, for example, SQ-map method and the adaptive distance field, due to the fact that in this case the bounding sphere and the virtual object represented by spherical harmonics are in the same spherical reference system.

Keywords haptic interaction; collision detection; spherical harmonics; distance field

0 引言

碰撞检测(Collision Detection, CD)作为虚拟手术仿真、虚拟战场、机器视觉、虚拟布料动态模拟等交互式仿真系统的重要组成部分, 需要在给定的时间状态下判断空间中两个或多个物体间是否占有相同区域, 并对占有相同区域的物体模

型做出几何响应。常用的碰撞检测方法有空间剖分、层次包围盒、图形图像检测法等。这些算法在刚性物体间的碰撞检测中已取得较好应用, 并形成相应的碰撞检测库, 如 Quick-CD(k-DOP)、PQ(Sphere)、SOLID(AABB)和 RAPID(OBB)等^[1]。但适用于刚体的碰撞检测方法未必适用于柔性体对象。因为

收稿日期: 2013-07-16; 修回日期: 2013-10-25

基金项目: 四川省教育厅科研项目(10ZA017); 西南科技大学研究生创新基金项目(13xx7113)

作者简介: 方艳红, 讲师, 研究方向为智能仪器设备、图像处理与模式识别、力触觉再现等技术, 电子邮箱: fangyanhong2004@126.com



柔性体在碰撞检测过程中会发生拓扑结构改变从而导致基本几何元素的增加或减少,重新构建或刷新柔性体几何描述所花费的时间往往超出实时仿真的要求^[2]。

因此,国内外研究者提出一系列改进方法。其中,距离场法作为一种最新的碰撞检测方法,是为物体模型建立距离场,通过判断空间物体在距离场中的位置确定物体之间是否碰撞。它可以直接返回表面法向量和穿刺深度等碰撞反馈信息,并具有碰撞检测速度快、自我碰撞检测等特点,适用于单点与柔性体的交互式碰撞检测;但是高密度采样距离场数据结构(如均匀3D网格、octrees和BSP-tree等)使内存消耗极大,从而影响碰撞检测的实时性。

在距离场计算中,为了降低距离场的计算复杂度及内存占用量,需要缩小空间点范围,用简单的包围盒将三角网格曲面围住,然后计算包围盒内每一3D栅格到三角网格曲面的最短距离,如SQ-map法^[3]和包围球法^[4]等。本文在此基础上,利用SH的多尺度特性实现三角网格曲面的包围球计算,将距离场信息映射在球坐标下,在球坐标下用基于SH表达的低尺度模型作为高尺度模型的包围球,将模型顶点距离值存入相应的距离场矩阵。

在研究球面调和函数(Spherical Harmonic Function,SH)表达三维物体^[5-9]的基础上,利用SH的多尺度特性实现3D模型距离场的计算,然后依据距离场碰撞检测方法实现物体间快速碰撞检测,并沿着距离的梯度方向进行柔性碰撞响应的快速估计。利用仿真实验,检测该算法对内存的占用量及实现交互工具与柔性体碰撞的有效性,并与传统的距离场碰撞算法进行比较,为柔性体力触觉交互系统的实现奠定理论基础。

1 基本概念

1.1 SH

SH是拉普拉斯方程球坐标系形式的解,对定义在单位球面上的任何一个连续可微函数 $f(\theta, \phi)$ 都可以通过SH展开为^[7-8]

$$f(\theta, \phi) = \sum_{l=0}^{+\infty} \sum_{m=-l}^l a_l^m Y_l^m(\theta, \phi) \quad (1)$$

式中, $Y_l^m(\theta, \phi)$ 为 l 次 m 阶的球面调和函数,展开式为:

$$Y_l^m(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{(2l+1)(l-|m|)!}{4\pi(l+|m|)!}} P_l^m(\cos(\theta)) e^{im\phi} \quad (2)$$

$P_l^m(\cos\theta)$ 为Legendre函数,定义为

$$P_l^m(x) = \frac{(-1)^m}{2^l l!} (1-x^2)^{m/2} \frac{d^{l+m}}{dx^{l+m}} (x^2-1)^l \quad (3)$$

式(1)中的 a_l^m 为调和系数,它的模长表示函数在频率(l, m)处的能量大小,并且满足:

$$\|f\|^2 = \sum_{l,m} |a_{l,m}|^2 \quad (4)$$

则调和系数 a_l^m 可表示为

$$a_l^m = \langle f, Y_l^m \rangle = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi Y_l^m(\cos\theta)^* f(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi \quad (5)$$

式(5)又被称为连续球面调和变换。

球面调和函数有3个重要的数学性质:正交归一性、旋转不变性、多尺度性。正交归一性和旋转不变性使得其可以很好地重构信号,即:任何闭合曲面都可以由一组线性SH的和表达出。多尺度特性使得它可以由粗到精地表达三维物体的细节部分,当尺度达到一定程度,物体重构表面接近物体原型。

1.2 距离场

距离场是一个标量场,表示空间中的点到一特定物体的最短距离。假定 S 为三维空间中一物体,即 $S \in R^3$,距离场函数的定义为

$$D: R^3 \rightarrow R$$

$$D(r, S) = \min_{s \in S} \{ |r-s| \}, \forall r \in R^3 \quad (6)$$

式中, r 为空间中的任一点。假设物体的几何模型是封闭的, D 可被定义为一个有符号函数, D 为负或零,表示空间当前点位于物体内部或表面,与物体发生碰撞; D 为正,表示该点在物体外部,不会发生碰撞。

在距离场计算中,为了提高其效率,经常会缩小空间点的范围,用简单的包围盒将三角网格曲面围住,然后计算包围盒内每一3D栅格到三角网格曲面的最短距离,如SQ-map法和包围球法等,本文在此基础上,利用SH的多尺度特性实现三角网格曲面的包围球计算。

2 基于SH与距离场的碰撞检测方法

基于SH表达距离场的碰撞检测方法分为距离场建立、碰撞检测、碰撞响应3部分。

2.1 基于SH表达的距离场计算

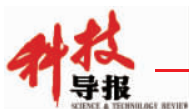
基于SH的距离场计算可以将低尺度SH表达模型作为三角网格曲面的包围球,将三维物体模型的空间坐标映射在球坐标下,然后计算球内每一3D栅格到三角网格曲面的最短距离,具体过程如下。

(1) 包围球建立。基于SH表达的低尺度几何模型就是一个包围球,其实现过程为物体几何模型球面参数化的过程,参数化后的物体模型映射在单位球上,在单位球上可实现几何模型的多尺度SH表达。

(2) 高尺度SH模型表达。用尺度 $l=15$ 下的柔性体SH表达模型代替物体原型,其球坐标下的表达式为

$$SH(\theta, \phi) = \begin{bmatrix} x(\theta, \phi) \\ y(\theta, \phi) \\ z(\theta, \phi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{l=0}^l \sum_{m=-l}^l a_{lk}^m Y_k^m(\theta, \phi) \\ \sum_{l=0}^l \sum_{m=-l}^l a_{ly}^m Y_k^m(\theta, \phi) \\ \sum_{l=0}^l \sum_{m=-l}^l a_{lz}^m Y_k^m(\theta, \phi) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, $0 < \theta < \pi, 0 < \phi < 2\pi$ 。



(3) 距离场映射。假设 C 与 r 分别代表包围球的球心与半径,在球坐标下,对高尺度 SH 模型进行采样(当物体几何模型不是很复杂,可将高尺度 SH 模型的顶点数定义为采样点数),利用式(8)计算每一采样点 (θ_i, ϕ_i) 到低尺度包围球相应点的法线距离,记录在距离场 $D(\theta_i, \phi_i)$ 中,生成距离场映射图。

$$D(r, SH) = |r - SH| \quad (8)$$

具体算法实现步骤为:

Input: 高尺度 SH 模型与低尺度 SH 包围球

Output: 距离场 D

for all $(\theta_i, \phi_i) \in (\theta, \phi)$, do

$$d \leftarrow \min \{ \|r - SH(\theta_i, \phi_i)\| \}$$

$$D(r, SH) \leftarrow d$$

end

基于 SH 表达的柔性体距离场生成后,可根据代表力交互设备的图标(marker)在场中的位置判断交互工具是否与柔性物体碰撞,要求 marker 在包围球与物体原型的距离场范围内移动。

2.2 碰撞检测

碰撞检测分为初步检测和精确检测两部分。初步检测利用模型内-外判断函数判断 marker 所在的空间位置是否在碰撞检测范围内,其模型内-外判断函数定义为

$$|X - C| > r \quad (9)$$

式中, X 为场景中的任意一点。

若式(9)成立,表明 marker 远离场景中的柔性体,不在碰撞检测范围内;若式(9)不成立,表明该点位于柔性体表面或内部,需要精确检测。具体碰撞检测流程图如图 1 所示。

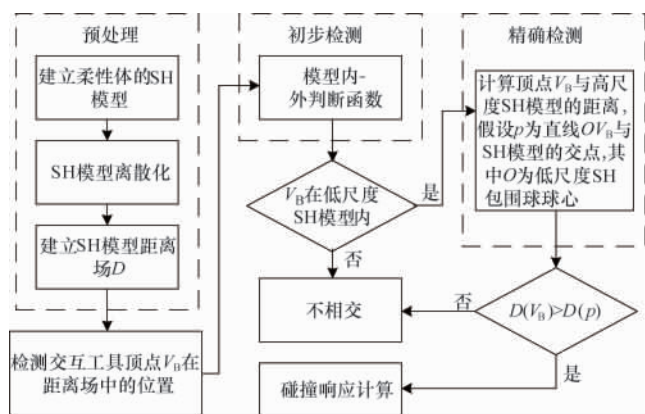


图 1 基于 SH 与距离场的碰撞检测流程

Fig. 1 SH and distance field based collision detection-block diagram

在精确检测仿真中,每一次时间刷新都将进行如下操作。

(1) 计算 marker 所在空间位置 V_B 与球心的距离 d , 获得矢量 d 的角度坐标 (θ_d, ϕ_d) 。

(2) 查找 (θ_d, ϕ_d) 是否属于柔性体的顶点坐标范围,若属

于,执行步骤(3);若不属于,执行步骤(4)。

(3) 若计算式(10)成立,表明 marker 没有与物体模型相交;若式(10)不成立,表明 marker 与物体模型发生碰撞。

$$\|d\| > \|SH(\theta_d, \phi_d)\| \quad (10)$$

(4) 在高尺度 SH 模型的顶点范围内选择与方位角 (ϕ_d, θ_d) 最相近的 4 个顶点,利用双线性插值法计算在距离场中的高尺度球面调和值,根据式(10)判断 marker 是否与柔性体相交。若式(10)成立,表明 marker 没有与物体模型相交;若式(10)不成立,表明 marker 与物体模型发生碰撞,计算碰撞响应。

2.3 计算碰撞响应

在柔性体力触觉渲染系统中,碰撞发生后,柔性体几何结构的拓扑改变是由施加在交互工具上的外作用力引起,受力方向一般为沿碰撞点切平面的法线方向;柔性体受力后所产生的反馈力可通过力交互设备传递给用户。

在基于距离场的碰撞检测算法中,力反馈可通过柔性体在切平面法线方向的距离改变来计算。若用简化的波动方程来表达碰撞点沿着法线方向所产生的力反馈,可写为^[10,11]:

$$F_{\text{ext}} = \rho \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) - \frac{E_m}{2(1+\nu)} \nabla^2 u \quad (11)$$

式中, ρ 为物体密度, E_m 为弹性模量, ν 为泊松比, u 为模型形变位移量。此时 u 是碰撞点沿着法线方向的距离改变,即:

$$u = |S_{\text{SH}}^{V_B} - D_{V_B}| \quad (12)$$

式中, V_B 为交互工具的顶点, D_{V_B} 为交互工具与柔性体最初接触时的距离场位置, $S_{\text{SH}}^{V_B}$ 为 V_B 在当前距离场中的位置。

结合 RBF 神经网络预计算方法可实现柔性体碰撞响应的实时计算,具体算法及实验分析见文献[12]。

3 实验分析

将基于 SH 与距离场的碰撞检测算法应用到具体的柔性体力交互实验系统中,应用背景为虚拟手术仿真,柔性体模型为虚拟人体肝脏模型。分别从距离场计算、碰撞检测准确度对其进行分析。

3.1 距离场计算分析

图 2 为虚拟肝脏模型的球面参数化映射及多尺度表达。由图 2 可以看出,随着调和尺度 (l) 的增加,模型细节得到较好表达,可以代替物体原型进行碰撞检测;低尺度模型可以作为高尺度模型的包围球完全密闭物体而又使空间最小。

在球面坐标下,基于低尺度包围球的物体模型的距离场计算利用式(8)实现。

相对于基于 SQ-map 法^[9]和包围球^[4]法的距离场计算方法,该方法的计算复杂度明显降低且准确度增强,因为距离场的计算是在同一参考系下不同尺度球面调和函数表达模型的距离计算;而 SQ-map 法需要先将物体模型分解成不同的子模型然后用 SQ 表达然后计算模型的距离场;包围球法需要计算每个采样点到球面的距离,计算量太大。

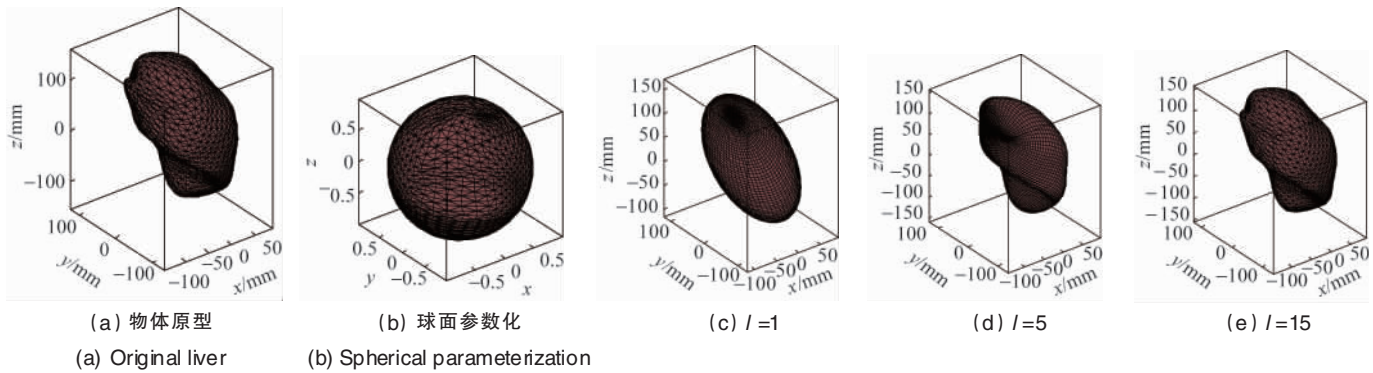


图2 肝脏模型表达及包围球

Fig. 2 Reconstructed liver and different scales of SH mode

相对于传统的三角形法距离场计算 (时间复杂度为 $O(N*M)$, N 为 3D 栅格个数, M 为三角面片个数) 和自适应距离场算法 (时间复杂度为 $O(N*\lg M)$), 内存占用量明显降低, 图 3 是采用 3 种不同方法计算肝脏模型距离场所需的内存空间对比图。

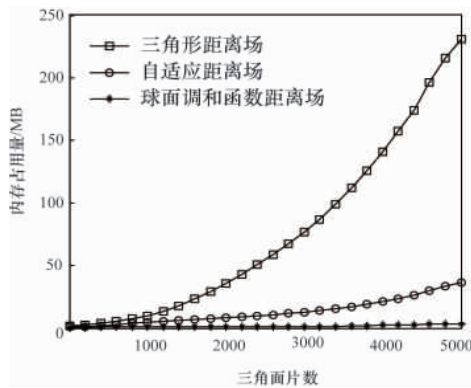


图3 距离场计算内存占用量分析

Fig. 3 Memory requirements for different distance map calculations

可以看出,随着采样密度的增加,3种方法计算模型距离场所需内存空间都会增加,但应用SH方法所需内存空间最小,即使加大采样密度(几千或上万),其内存占用量仍旧满足要求。因此,基于SH表达的柔性体距离场计算是一种节省内存,计算速度快的方法。

3.2 碰撞检测分析

碰撞检测目的就是实时检测 marker 的当前位置是否与虚拟环境中的 3D 模型发生碰触,若发生碰触则通过力触觉设备与操作者进行力触觉交互。系统检测到 marker 与肝脏模型的碰撞并确定其碰撞位置后,可根据力反馈设备施加在肝脏模型上的作用力计算物体的形变。作用力-形变计算方法的依据为简易波动方程。

模型间碰撞检测的实时性指标利用平均碰撞检测时间来衡量。平均碰撞检测时间是指在相同作用力以及物理属性描述下,检测到小球与肝脏模型碰撞事件的平均。在基于SH

表达的距离场碰撞检测中,当两个物体模型都为球时(即低尺度SH表达),平均碰撞检测时间最小,随着物体模型形状复杂度的增加,平均碰撞检测时间会增加。

图4是不同尺度SH模型在相同作用力与物理属性描述下平均碰撞检测时间对比图。系统运行环境为Vizard 4.0与Dell Precision T7500图形工作站。

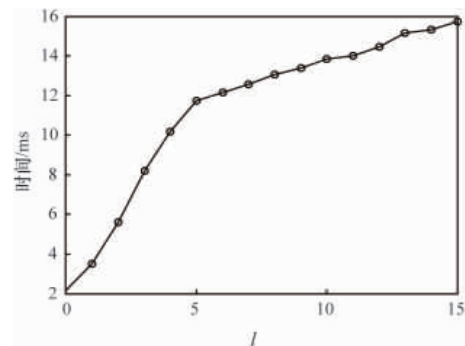


图4 不同尺度SH模型的平均碰撞检测时间

Fig. 4 Mean time of collision detection represented with different scales of SH mode

由图4可以看出,在低尺度SH表达模型下,模型间的平均碰撞检测时间最小,随着模型复杂度的增加,平均碰撞检测时间会相应增加,但总的检测时间在毫秒级分析范围之内。因此,基于SH表达的距离场碰撞检测算法是一种实时有效的碰撞检测算法。

4 结论

提出一种新的基于SH表达的柔性体距离场碰撞检测方法,该方法不仅具备距离场碰撞检测算法的检测速度快、准确性高等优点,而且有效避免了常用距离场计算方法中内存占用量大、计算复杂等缺点;结合贝叶斯、神经网络等预计算方法可实现柔性体碰撞响应的实时计算,从而解决由于视觉刷新频率远远小于力触觉刷新频率而导致的渲染失真问题,为实时的柔性体力触觉交互提供理论基础。

参考文献 (References)

[1] 邹益胜, 丁国富, 许明恒, 等. 实时碰撞检测算法综述[J]. 计算机应用, 2008, 25(1): 213-215.
Zou Yisheng, Ding Guofu, Xu Mingheng, et al. Application Research of Computers, 2008, 25(1): 213-215.

[2] Fang Y, Wu B. A novel haptic deformation modeling method using spherical harmonic representation and radial basis function neural network [J]. International Journal of Digital Content Technology and Its Applications, 2011, 5(10): 105-111.

[3] Moustakas K, Tzovaras D, Srintzis M G. SQ-map: Efficient layered collision detection and haptic rendering [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2007, 13(1): 80-92.

[4] Vogianou A, Srintzis M G, Moustakas K, et al. Distance maps for collision detection of deformable models[C]//Computer Graphics and Visualization 2008 and Gaming 2008: Design for Engaging Experience and Social Interaction 2008, MCCSIS'08-IADIS Multi Conference on Computer Science and Information Systems, Amsterdam, Netherlands, July 27, 2008: 216-220.

[5] Shen L, Saykin A J, Chung M K, et al. Morphometric analysis of genetic variation in hippocampal shape in mild cognitive impairment[C]//Role of an IL-6 promoter Polymorphism. CSB 2006: LSS Computational Systems Bioinformatics Conference, Stanford University, August 14-18, 2006.

[6] Shen L, Farid H, McPeck M A. Modeling 3-dimensional morphological structures using spherical harmonics [J]. Evolution, 2009, 63 (4): 1003-1016.

[7] McPeck M A, Shen L, Farid H. The correlated evolution of 3-dimensional reproductive structures between male and female damselflies [J]. Evolution 2009,63:73-83.

[8] Shen L, Makedon F S. Spherical mapping for processing of 3-D closed surfaces[J]. Image and Vision Computing, 2006, 24(7): 743-761.

[9] Fang Y, Wu B. A novel method of soft tissue haptic rendering based on the spherical harmonic representation[C]//Proceedings of 2nd International Conference on Information Science and Engineering, Hangzhou: ICISE, 2010: 1847-1850.

[10] 方艳红, 吴斌, 杨正宜. 基于球面调和函数的柔性体力触觉建模研究 [J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(9): 1091-1094.
Fang Yanhong, Wu Bin, Yang Zhengyi. Computer Engineering and Design, 2011, 32(9): 1091-1094.

[11] 方艳红, 吴斌, 杨正宜. 虚拟柔性体实时形变仿真模型研究 [J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(7): 2730-2733.
Fang Yanhong, Wu Bin, Yang Zhengyi. Computer Engineering and Design, 2012, 33(7): 2730-2733.

[12] 方艳红, 吴斌, 杨正宜. 柔性体力触觉形变模型研究[J]. 计算机工程与应用[J]. 2012, 48(14): 51-55.
Fang Yanhong, Wu Bin, Yang Zhengyi. Computer Engineering and Application, 2012, 48(14): 51-55.

(责任编辑 赵业玲)

· 学术动态 ·



中国科协第 82 期“新观点新学说学术沙龙”聚焦超材料

2013 年 9 月 26—27 日, 由中国科协主办、中国电子学会承办的第 82 期“新观点新学说学术沙龙”在北京召开, 近 30 位国内知名专家学者与会研讨。

中国工程院院士段宝岩表示, 近年来超材料对航空航天等许多国防、民用科学技术产生了极大的促进作用, 新材料将会成为科学研究一个很重要的切入点和突破点, 将会对众多领域带来很大的冲击和影响, 并产生新的战略产业, 研究超材料的意义极为深远。

清华大学材料科学与工程系教授周济做题为“材料学视角下的超材料”的学术报告, 认为利用超材料可以获得高于自然材料的性能, 并非自然材料不具备的性能; 利用超材料思想和经典材料系统可以获得量子系统才能获得的特性(类似量子行为); 基于超材料指导思想的功能材料设计与制备可以实现超材料与自然材料的完全融合。

西安交通大学科技处副处长徐卓、西北工业大学教授赵晓鹏、东南大学信息科学与工程学院副院长崔铁军、南京大学材料科学与工程系主任陈延峰等分别作学术报告。

专家围绕超材料领域交叉科学研究热点、超材料前沿技术中的关键科学与技术问题、超材料技术应用领域及实用化过程的若干重大问题等议题展开深入研讨。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35533/n38575/15133053.html>。