

基于空间散列法的虚拟植物碰撞检测算法

李长锋 郭新宇 赵春江 陆声链 杨月英

(国家农业信息化工程技术研究中心 北京 100089)

摘要 根据虚拟植物模型复杂的特点,采用在精细的三角形网格模型上所创建的较粗糙的四面体网格模型,在虚拟植物模型上实现基于空间散列法的碰撞和自碰撞检测。该算法具有高效快速、无需复杂的数据结构等特点。实验结果表明,该算法能够有效地解决群体中植株的碰撞和自碰撞问题,并能够达到实时的处理要求。可同时适用于其它复杂的三维模型的碰撞检测问题。

关键词 虚拟植物 实时 碰撞检测 可变形物体 四面体网格

SPATIAL HASHING BASED COLLISION DETECTION ALGORITHM FOR VIRTUAL PLANTS

Li Changfeng Guo Xinyu Zhao Chunjiang Lu Shenglian Yang Yueying

(National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100089, China)

Abstract According to the complexity feature of virtual plant models, using coarser tetrahedral mesh model created on refined triangle mesh model, we implemented the collision and self-collision detection on virtual plant models based on spatial hashing method. The algorithm has the features of efficiency and fastness and does not require complex data structure. The experimental results show that this algorithm can effectively resolve the collision and self-collision detection problems of virtual plants. It can meet real-time processing requirement and is suitable for collision detection problems of other complex 3D models.

Keywords Virtual plants Real time Collision detection Deformable object Tetrahedral meshes

0 引言

近年来,虚拟植物作为虚拟现实技术在数字农业领域中的一个典型应用,其应用价值已受到越来越多的重视^[1]。虚拟植物是应用计算机模拟植物在虚拟环境中的生长发育状况,生成可以反映现实植物形态结构、具有真实感的三维植物个体或群体模型。应用这些虚拟植物模型,可以在虚拟农田环境系统中进行虚拟实验,以替代现实世界中难以进行或费时、费力、昂贵的试验,缩短某些研究课题的试验周期或节省大量的试验费用,如虚拟育种、虚拟施肥、虚拟剪枝等。

碰撞检测是虚拟现实研究中一个热点问题^[2-5],但在目前的虚拟植物研究中,虚拟场景中的碰撞检测问题往往被忽略。一方面,碰撞检测和碰撞反应的处理是一个十分困难的问题。另一方面,植物的形态各异、结构复杂,即便在同一棵植物上,同一个器官和不同器官之间都会发生碰撞;在群体环境中,这种情况更加普遍。由于缺乏有效的碰撞检测方法,使得现有的虚拟植物建模软件构建的植物模型普遍存在器官相互穿插的现象,特别是在植物群体环境下。这无疑降低了所生成的植物模型的真实感。

为此,本文提出了一种专门用于虚拟场景中的植物模型的碰撞检测和响应处理方法。具体地,根据文献[6]所描述的算法,在虚拟植物模型上实现了基于空间散列法的碰撞和自碰撞检测。该算法将所有对象元素,即顶点和四面体,都根据其轴向

包围盒 AABB 进行分类。使用散列函数将三维包围盒与一维散列表索引进行对应。这样,每个散列索引都包含一些几何元素,对这些对象元素再进行碰撞检测。由于散列表索引可能包含同一物体的多个元素,或者不同物体的多个元素,因此自碰撞和不同物体的碰撞都可以被检测到。实际碰撞检测时还需要计算穿透四面体的重心坐标,该信息随后可用于估计四面体碰撞对的穿透深度;而穿透深度可用于进一步的处理,如碰撞反应。实验结果表明,文章提出的方法能够有效地解决植株器官的自碰撞和不同器官之间的碰撞问题,以及虚拟环境中其他物体与虚拟植物的碰撞,并能够达到实时的处理要求。

1 相关研究

基于包围盒(BV)的碰撞检测算法已经被证明非常有效,人们也提出了不同种类的包围盒。如球体、轴对齐包围盒(AABB)、有向包围盒(OBB),以及离散有向多面体(k-DOP)等。

最初,包围盒是针对刚体设计的。包围盒层次体系的构建是一个预处理的过程。而对于可变形物体,这个层次体系需要

收稿日期:2007-11-19。国家836计划课题(2007AA10Z224);国家科技支撑项目课题(2006BAD10A07);北京市自然科学基金项目(4062015)。李长锋,硕士,主研领域:计算机辅助几何设计,计算机图形学研究。

在运行时不断地更新。尽管针对可变形物体的包围盒层次体系已经做了大量的优化工作,但对于复杂的物体或场景,这种更新还是带来了巨大的计算消耗和存储压力。另外,囿于物理模拟程序的限制,包围盒算法通常仅检测表面是否相交,而碰撞反应所需要的穿透深度往往需要额外的计算。

除了物体分割法,其它算法,如离散距离场的方法,也被用来进行碰撞检测。不过根据该方法的结果,应该不太适合实时处理过于复杂的几何形体模型或场景。

近来,各种应用图形硬件来处理碰撞检测的算法被提出。在文献[7]中,提出了用于碰撞检测的多通道渲染方法。不过,该算法只能处理凸体。而文献[8]采用了图形硬件加速处理圆柱体工具与可变形组织之间的交互。文献[9]提出了针对二维物体碰撞检测的多通道渲染算法,而文献[10,11]同时使用了多通道渲染和包围盒层次体系来进行最近点的求取。上述方法都将物体分解成凸多面体。

关于碰撞检测的空间分割法有许多种。这些算法大都采用统一的网格^[12-14]或二元空间划分(BSP)^[15]。在文献[12]中,提到了针对碰撞检测的空间散列法,但并未给出细节。文献[16]提出了作为机器人路径规划算法一部分的层次空间散列法,不过该算法仅限于刚体。

本文以黄瓜为例,在其可变形四面体网格上应用了空间散列法进行碰撞检测,其三维模型和相应的四面体网格见图1所示。三维空间被隐式分割成许多小网格单元。不再需要虚拟环境的整体包围盒信息和其它三维数据结构,如网格或BSP等。另外,该方法对碰撞和自碰撞均可进行检测。算法的各种参数也经过了研究和优化。



图1 三角形网格模型(左)
与对应四面体网格模型(右)

2 碰撞检测算法

碰撞检测算法隐舍地将整个三维空间分割成许多小的AABB。首先,所有物体的所有顶点均根据它们所占据的小三维网格单元进行分类。然后,所有四面体也根据这些网格单元进行分类。如果某四面体与某个网格相交,则所有与该网格相关的顶点便与该四面体进行相交测试。在实际相交测试时,计算四面体的重心坐标,以估算出顶点是否穿透该四面体。

对所有物体元素的一致性处理确保了算法既可进行碰撞检测,也可进行自碰撞检测。如果某个顶点穿透了四面体,则发生了一次碰撞。如果该顶点和四面体属于同一物体,则发生了一次自碰撞。如果该顶点本身就属于四面体,则取消本次碰撞测试。

2.1 顶点空间散列

首先,根据用户自定义的网格单元大小,对所有顶点位置进行离散化处理。即将顶点位置坐标 (x, y, z) 除以给定的网格单元大小 l ,取整数为 (i, j, k) : $i = \lfloor x/l \rfloor$, $j = \lfloor y/l \rfloor$, $k = \lfloor z/l \rfloor$ 。

散列函数 $hash$ 将这些离散化的三维数据点 (i, j, k) 映射到一维索引 h ,顶点和物体信息便存储于散列表索引 h 处: $h = hash(i, j, k)$ 。

在应用中,测试了多个散列函数,主要是加法和旋转散列函数。该散列函数输入为三个值,描述了顶点的位置 (x, y, z) ,返回散列值:

$$hash(x, y, z) = (x \cdot p1 \text{ xor } y \cdot p2 \text{ xor } z \cdot p3) \bmod n$$

这里, $p1, p2, p3$ 是很大的素数,其值分别为 73856093、19349663、83492791。 n 为散列表的大小。

该函数计算快速,对较小的散列表仅产生相对较少的冲突。实际上,对于越大的散列表散列函数的质量越不重要。

除了为每个顶点生成相应的关键码值,还要计算当前状态下所有四面体的AABB。

2.2 四面体空间散列

前一步创建了所有顶点的散列表,并更新了四面体网格的AABB,下一步则遍历所有四面体。

首先,计算描述四面体的AABB的最大和最小值。然后,将这些数值对用户自定义的网格大小取模。再计算所有被四面体的AABB影响到的网格的关键码值。然后,对AABB从最小到最大关键码值进行网格遍历(见图2)。所有根据散列表索引找到的顶点均需要进行相交测试。

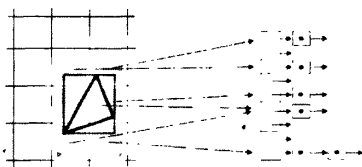


图2 对四面体的AABB所占据的散列表值进行计算四面体与散列表索引中包含的所有顶点进行相交测试^[6]

2.3 相交测试

如果顶点 p 与四面体 t 映射到同一散列表索引,而且 p 不是 t 的一部分,则需要相交测试。

实际的相交测试包括两步。第一步, p 相对于 t 的AABB进行检测, t 已经进行过更新。如果 p 穿透了 t 的AABB,则进行第二步测试 p 是否在 t 之内。该测试计算 p 关于 t 某顶点的重心坐标。详情如下。

对于四面体 t ,其各个顶点为 x_0, x_1, x_2, x_3 ,判断顶点 p 是否与其相交本文采用了两种方法。第一种方法需要计算顶点相对于四面体顶点的重心坐标。第二种方法要考虑四面体有向面,并检查顶点位于该有向面的正半空间还是负半空间。

由于重心坐标测试比半空间测试运算速度稍微要快一些,实验中采用了该方法来判断顶点是否位于四面体内:

相对于 x_0 的重心坐标:设坐标系原点在 x_0 ,坐标轴与四面体 t 中与 x_0 邻近的棱边相重合,对于顶点 p ,若其在该坐标系下的新坐标为 $\beta = (\beta_1, \beta_2, \beta_3)^T$ 。则点 p 可表示为:

$$p = x_0 + A\beta \quad (1)$$

其中 $A = [x_1 - x_0, x_2 - x_0, x_3 - x_0]$,是一个 3×3 的矩阵。则点 p 在该新坐标系下的坐标 β 为:

$$\beta = A^{-1}(p - x_0) \quad (2)$$

若点 p 符合如下条件,则其位于四面体内: $\beta_1 \geq 0, \beta_2 \geq 0, \beta_3 \geq 0$,并且 $\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 \leq 1$ 。

3 相关参数

3.1 散列表大小

散列表的大小对碰撞检测算法的性能具有极大的影响。测试表明,更大的散列表降低了把不同三维位置映射到同一散列表索引的概率。因此,该算法通常对越大的散列表运算越快。另一方面,由于内存管理的原因,更大的散列表也会造成性能的一些下降。图3显示了对某一场景不同散列表大小对算法性能影响。

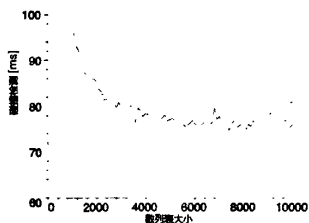


图3 碰撞检测算法计算时间与散列表大小之间的关系图表^[6]

应用中,在每一模拟步长开始时并未进行再次初始化,对于很大的散列表这可能会导致性能下降。为了避免该问题,每一模拟步长均标记了一个唯一的时间印记。如果算法的第一步中在散列表中所存储的顶点时间印记过时,则在插入新的顶点前对其进行更新,并重置单元。如果时间印记已经更新,则新的顶点附加于散列表单元中。在算法第二步为四面体生成散列表索引时,将当前的时间印记与散列表中存储的时间印记进行对比。如果不同,则散列表中的时间印记过时,无需进行相交测试。因此,没有预初始化的散列表必须在模拟过程中进行处理,对于较大的散列表这将导致相对大的开销。

3.2 网格大小

用于空间散列划分的网格大小影响着物体几何元素的数目,它们都映射到同一散列表索引中。对于较大的网格单元,每一散列表索引中包含的几何元素数目会更多,相交测试会更少。如果网格单元明显小于四面体,则四面体将占据大量的网格,从而导致要对四面体与许多散列表索引中的顶点进行相交测试。为了获取最佳的性能表现,网格单元大小应该与四面体的平均长度相当。同时根据图表显示,网格单元大小比散列表大小或散列函数对性能的影响更大。

3.3 时间复杂度

设几何元素(顶点和四面体)的个数为 n 。为了找到所有顶点—四面体相交对,一个简单的方法是对所有顶点,将其与所有四面体进行相交测试,其时间复杂度为 $O(n^2)$ 。本文所应用的算法将复杂度降到 $O(n)$ 。由于在每一时间步长都需要对所有几何元素进行变形算法计算,碰撞检测的线性时间复杂度并不会降低其性能表现。

4 实验结果

我们采用 Visual C++ 开发平台实现了本文所述算法,并通过三维重建的方法生成了黄瓜的植株模型。在此基础上进行了

碰撞检测实验。实验使用的机器配置为: Intel Pentium 4, 1.8GHz CPU, 2GB 内存, 配备 256MB 显存的 NVIDIA GeForce7900GS 显卡。在该机器上对三维黄瓜植株模型进行了碰撞检测实验,程序可以 75 帧/秒的速度运行。黄瓜与球体碰撞模拟的效果见图4所示。每株黄瓜模型含有顶点 22,004 个,面片 30,244 个,其相对应的四面体网格模型的顶点数为 521 个,四面体 1431 个。

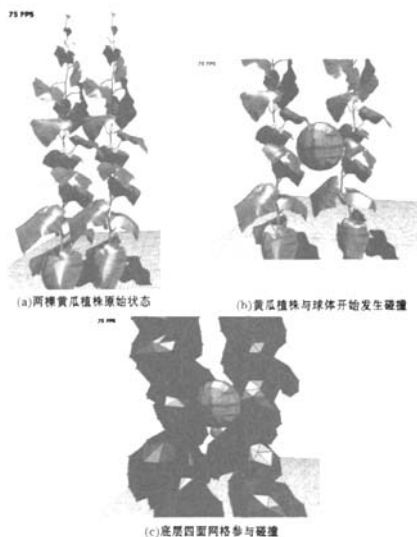


图4 黄瓜与球体碰撞模拟效果图

5 讨论

基于空间散列法的碰撞检测算法可检测顶点是否与四面体相交,但无法检测边是否与四面体相交。这主要基于两个原因。第一,对于密集取样的物体,边测试的适当性并不清楚,算法的性能会急剧下降。第二,碰撞检测是要作为基于物理原理环境模拟的一个组件,与碰撞反应相集成。而顶点穿透的碰撞反应可以很容易地实现,但要实现边穿透的碰撞反应既罕见,代价也比较昂贵。

该算法的实现是基于四面体。不过,并不仅限于四面体,它还可以处理其它几何元素,只需要同时改变一下相交测试即可。

6 结论

本文将动态可变形物体的碰撞和自碰撞检测的最新算法应用于虚拟植物的物理模拟上。与传统方法计算所有物体整体包围盒并显式进行空间分割不一样,该算法采用了散列函数来映射三维网格到散列表中,实现了高效而隐式的空间分割。实际的顶点—四面体测试基于重心坐标,该测试提供的信息可用于基于物理的碰撞反应。根据虚拟植物的特点,对算法的参数进行了研究和优化,对不同场景的实验表明,包含 20,000 多个四面体的场景可以实时地进行处理,完全独立于物体的个数。该算法既可用于各种植物模型,也可应用于其它复杂模型和场景的碰撞检测处理,具有实时、快速的特点,在三维植物群体设计、虚拟场景漫游等应用中有着潜在的应用价值。

参考文献

- [1] 郭焱,李保国. 虚拟植物的研究进展[J]. 科学通报, 2001, 46(4): 608-615.
- [2] Terzopoulos D, Platt J, Barr A, Fleischer K. Elastically Deformable Models[C]. Proc. of Siggraph '87, naheim, California, 1987: 205-214.
- [3] Terzopoulos D, Fleischer K. Deformable Models. The Visual Computer, 1988, 4:306-331.
- [4] Baraff D, Witkin A. Dynamic Simulation of Nonpenetrating Flexible Bodies. Computer Graphics, 1992, 26(2): 303-308.
- [5] Gibson S, Mitrich B. A Survey of Deformable Models in Computer Graphics. Technical Report TR-97-19, Mitsubishi Electric Research Laboratories Merl, Cambridge, Massachusetts, 1997.
- [6] Teschner M, Heidelberger B, Mueller M, Pomeranets D, Gross M.: Optimized spatial hashing for collision detection of deformable objects. In Proceedings of Vision, Modeling, Visualization VMV'03 2003: 47-54.
- [7] Baciú G, Wong W, Sun H. Recode: an image-based collision detection algorithm. The Journal of Visualization and Computer Animation, 1999, 10:181-192.
- [8] Lombardo J, Cani M.-P, Neyret F, Real-time collision detection for virtual surgery. Proceedings of Computer Animation '99, 1999:33-39.
- [9] Hoff K, Zafarakis A, Lin M, Manocha M, Fast and simple 2D geometric proximity queries using graphics hardware. Proceedings of Symposium on Interactive 3D Graphics '01, 2001:145-148.
- [10] Kim Y, Otaduy M, Lin M. Manocha D. Fast penetration depth computation for physically-based animation. Proceedings of Acm Siggraph Symposium on Computer Animation '02, 2002:23-31.
- [11] Kim Y, Hoff K, Lin M, Manocha D. Closest point query among the union of convex polytopes using rasterization hardware. Journal of Graphics Tools, 2003, to appear.
- [12] Turk G. Interactive collision detection for molecular graphics. Technical Report TR90-014, University of North Carolina at Chapel Hill, 1990.
- [13] Ganovelli F, Dingliana J, O'Sullivan C. BucketTree: Improving collision detection between deformable objects. Proceedings Spring Conference on Computer Graphics Socg '00, Budmerice Castle, Bratislava, 2000.
- [14] Zhang D, Yuen M. Collision detection for clothed human animation. Proceedings of Pacific Graphics '00, 2000:328-337.
- [15] Melax S. Dynamic plane shifting Bsp traversal. Proceedings of Graphics Interface '00, 2000:213-220.
- [16] Mitrich B. Efficient algorithms for two-phase collision detection. Technical Report TR-97-23, Mitsubishi Electric Research Laboratory, 1997.

(上接第132页)

PBS需要给每个测试用例赋予一个优先数 P ,然后按照有限数给测试用例排序,有限数高的先于其它执行。在每次执行完成以后,有限数会随着执行结果的变化而变化。

优先数的确定有两个来源:一是测试用例本身的优先级,这是一个常量;二是测试结果对优先数的影响,这是一个变量。

测试用例本身是有优先级的。给每个测试用例赋予一个优先数常量 P_0 ,这个优先级主要从两个方面来确定,一是它覆盖的功能,二是执行测试用例的代价。原则是:基本功能优先,新功能优先,各平台通用功能优先,然后再综合它的执行代价,代价低的测试用例优先执行。

测试是一个连续的过程,测试用例在每次执行之后都会有一个状态,这就是测试的结果。这也是优先数变化的来源之一,

即优先数的变化跟测试结果和测试用例覆盖率相关。这一部分是一个变化的值优先数变量 ΔP 。

测试用例执行结果无外两种,一是发现缺陷测试未通过;二是测试通过。

我们有理由相信发现缺陷越多的模块,隐含的缺陷越多。因此,如果执行一个测试用例发现了缺陷,则再执行该测试用例能发现缺陷的可能性就大,故应有 $\Delta P > 0$ 。发现的缺陷严重程度(这里用 S 表示)越高,存在隐含缺陷的可能性就越大,所以,优先数增加的数字就越大,即 $\Delta P \propto S$ 。相反,执行顺利通过的测试用例,其优先数需要减小,即 $\Delta P < 0$ 。

测试用例还有可能不被执行。为了避免某些测试用例总是不被执行,所以,未执行的测试用例优先数需要增加, $\Delta P > 0$ 。当然这个幅度增加不会很大。

测试过程中,我们对程序进行代码注入,执行完成后,可以计算每个测试用例的代码覆盖率,这里采用剩余语句优先,给所有的测试用例按照覆盖率高低排序,首先选择出覆盖率最高的,然后调整其他测试用例的覆盖数据来选择最大覆盖了先前选中的没有覆盖的代码的那个用例,一直重复此过程。

在被执行一次之后,各个测试用例的优先数为:

$$P_n = P_{n-1} + \Delta P_n \quad (9)$$

式中 n 表示测试用例执行次数。

4 结论

本文在以往测试用例排序技术的基础上,提出了成本-收益模型,并在此基础上提出了一个划算的回归测试用例排序算法。算法考虑了测试用例本身的优先级,执行代价,同时考虑了测试用例执行结果和代码覆盖率对测试优先级的影响。

下一步的工作是进行经验研究,分析对于各种不同类型的程序,以及算法如何在各种因素之中取得平衡,以达到最有效的排序结果。

参考文献

- [1] Elbaum S, Malishevsky A, Rothermel G. Prioritizing test cases for regression testing. In Proc. Int' L Symp. Software Testing and Analysis, pages 102-112, Aug. 2000.
- [2] Elbaum S, Malishevsky A, Rothermel G. Incorporating varying test costs and fault severities into test case prioritization. In Proc. 23rd Int' L. Conference on Software Engineering, May 2001:329-338.
- [3] Elbaum S, Malishevsky A, Rothermel G. Test case prioritization: A family of empirical studies. IEEE Transactions of Software Engineering, 2002, 28(2):159-182.
- [4] Elbaum S, Kallakuri K, Malishevsky A G, et al. Understanding the effects of changes on the cost-effectiveness of regression testing techniques. Journal of Software Testing, Verification, and Reliability, 2003, 13(2):65-83.
- [5] Wong W E, Horgan J R, London S, Agrawal H. A Study of Effective Regression Testing in Practice. Proc. Eighth Int' L Symp. Software Reliability Engineering, Nov. 1997, 230-238.
- [6] Srivastava A, Thiagarajan J. Effectively Prioritizing Tests in Development Environment. Proc. ACM SIGSOFT Int' L Symp. Software Testing and Analysis, 2002:97-106.
- [7] Kim J M, Porter A. A history-based test prioritization technique for regression testing in resource constrained environments. In Proceedings of the International Conference on Software Engineering, May 2002.

作者: [李长锋](#), [郭新宇](#), [赵春江](#), [陆声链](#), [杨月英](#), [Li Changfeng](#), [Guo Xinyu](#), [Zhao Chunjiang](#), [Lu Shenglian](#), [Yang Yueying](#)
作者单位: [国家农业信息化工程技术研究中心, 北京, 100089](#)
刊名: [计算机应用与软件](#) **ISTIC**
英文刊名: [COMPUTER APPLICATIONS AND SOFTWARE](#)
年, 卷(期): 2009, 26(4)

参考文献(16条)

1. 郭焱;李保国 [虚拟植物的研究进展](#)[期刊论文]-[科学通报](#) 2001(04)
2. Terzopoulos D;Platt J;Barr A;Fleischer K [Elastically Deformable Models](#) 1987
3. Terzopoulos D;Fleischer K [Deformable Models](#)[外文期刊] 1988
4. Baraff D;Witkin A [Dynamic Simulation of Nonpenetrating Flexible Bodies](#) 1992(02)
5. Gibson S;Mitrich B [A Survey of Deformable Models in Computer Graphics](#)[Technical Report TR-97-19] 1997
6. Teschner M;Heidelberger B;Mueller M;Pomeranets D.Gross M [Optimized spatial hashing for collision detection of deformable objects](#) 2003
7. Baci G;Wong W;Sun H [Recode:an image-based collision detection algorithm](#)[外文期刊] 1999
8. Lombardo J;Cani M -P;Neyret F [Real-time collision detection for virtual surgery](#) 1999
9. Hoff K;Zaferakis A;Lin M;Manocha M [Fast and simple 2D geometric proximity queries using graphics hardware](#) 2001
10. Kim Y;Otaduy M;Lin M;Manocha D [Fast penetration depth computation for physically-based animation](#) 2002
11. Kim Y;Hoff K;Lin M;Manocha D [Closest point query among the union of convex polytopes using rasterization hardware](#)[外文期刊] 2003
12. Turk G [Interactive collision detection for molecular graphics](#)[Technical Report TR90-014] 1990
13. Ganovelli F;Dingliana J;O'Sullivan C [BucketTree:Improving collision detection between deformable objects](#) 2000
14. Zhang D;Yuen M [Collision detection for clothed human animation](#) 2000
15. Melax S [Dynamic plane shifting Bsp traversal](#) 2000
16. Mirtich B [Efficient algorithms for two-phase collision detection](#)[Technical Report TR-97-23] 1997

本文读者也读过(9条)

1. [王玉洁](#), [姚允聪](#), [王怀威](#), [康世彬](#), [WANG Yu-jie](#), [YAO Yun-cong](#), [WANG Huai-wei](#), [LIAN Shi-bin](#) [可穿戴计算机及其在农业中的应用](#)[期刊论文]-[北京农学院学报](#)2005, 20(3)
2. [雷蕾](#), [郭新宇](#), [周淑秋](#), [雷镇](#), [Lei Lei](#), [Guo Xinyu](#), [Zhou Shuqiu](#), [Lei Zhen](#) [黄瓜果实的几何造型及可视化研究](#)[期刊论文]-[计算机应用与软件](#)2006, 23(5)
3. [向华平](#), [XIANG Hua-ping](#) [基于边界拓扑转化的四面体与六面体网格动态连接技术](#)[期刊论文]-[安徽大学学报\(自然科学版\)](#) 2011, 35(2)
4. [王锋](#), [孙自富](#), [刘建勋](#), [项奉才](#), [叶春美](#) [内源性干扰素在以高热为特征猪病防治中的应用](#)[期刊论文]-[现代农业科技](#)2009(14)

5. [肖伯祥](#), [郭新宇](#), [郑文刚](#), [王丹虹](#), [XIAO Bo-xiang](#), [GUO Xin-yu](#), [ZHENG Wen-gang](#), [WANG Dan-hong](#) [玉米雌穗几何造
型研究](#)[期刊论文]-[工程图学学报](#)2007, 28(2)
6. [孙云峰](#), [韦玉春](#), [SUN Yun-feng](#), [WEI Yu-chun](#) [基于组件式GIS的农业管理信息系统研究](#)[期刊论文]-[农机化研究](#)
2006(7)
7. [任东](#), [于海业](#), [乔晓军](#), [REN Dong](#), [YU Hai-ye](#), [QIAO Xiao-jun](#) [基于SVM的温室黄瓜病害诊断研究](#)[期刊论文]-[农机
化研究](#)2007(3)
8. [杨亮](#), [郭新宇](#), [赵春江](#), [乔晓军](#), [陆声链](#), [YANG Liang](#), [GUO Xin-yu](#), [ZHAO Chun-jiang](#), [QIAO Xiao-jun](#), [LU Sheng-
lian](#) [基于立体视觉的玉米叶片形态测量与三维重建](#)[期刊论文]-[计算机应用](#)2008, 28(10)
9. [王生保](#), [夏振华](#), [罗亚萍](#) [基于农业工程中计算机声像技术应用的研究](#)[期刊论文]-[农业考古](#)2008(3)

引证文献(1条)

1. [肖伯祥](#), [郭新宇](#), [陆声链](#), [温维亮](#), [郭小东](#) [植物三维形态虚拟仿真技术体系研究](#)[期刊论文]-[应用基础与工程科学学
报](#) 2012(4)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_jsjyyyrj200904082.aspx