

# 作物可视化中的碰撞检测及响应研究

伍艳莲<sup>1,2</sup> 汤 亮<sup>1</sup> 曹卫星<sup>1</sup> 朱 艳<sup>1</sup>

(南京农业大学江苏省信息农业高技术研究重点实验室 南京 210095)<sup>1</sup>

(南京农业大学信息科技学院 南京 210095)<sup>2</sup>

**摘 要** 将碰撞检测与响应技术引入作物可视化生长模拟,针对以 NURBS 曲面表示的作物叶片,提出了一种基于曲面分割技术及混合层次包围盒实现作物叶片间碰撞检测的方法。首先采用节点插入技术分割叶片曲面,然后为分割后的叶片曲面建立轴向包围盒(AABB)与固定方向凸包(FDH)的混合层次包围盒树:根节点采用 AABB 包围盒,以快速排除不可能相交的叶片;其它层节点采用 FDH 包围盒,以保证精确地判定距离较近的叶片间碰撞状态。在此基础上,根据作物叶片形态变化规律,提出了较合理、有效的冲突响应机制。实例分析表明,所建立的算法可有效地应用于作物叶片碰撞的模拟实现。

**关键词** 作物可视化,碰撞检测,碰撞响应,曲面分割,层次包围盒

**中图法分类号** TP391.9 **文献标识码** A

## Collision Detection and Response in Crop Visualization

WU Yan-lian<sup>1,2</sup> TANG Liang<sup>1</sup> CAO Wei-xing<sup>1</sup> ZHU Yan<sup>1</sup>

(Jiangsu Key Laboratory for Information Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)<sup>1</sup>

(College of Information Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)<sup>2</sup>

**Abstract** Adopting the collision detection and response methodology into the field of crop growth visualization, an algorithm used for collision detection between leaves defined by NURBS (Non Uniform Rational B-Spline) surfaces was proposed based on the techniques of surface subdivision and hybrid hierarchical bounding volume (HHBV). Firstly, the leaf surface was subdivided by using the technique of inserting node. Secondly, a HHBV tree for the subdivided leaf based on AABB(Axis-Aligned Bounding Box) and FDH(Fixed Direction Hull) was developed. The HHBV tree used AABB as its root node for fast overlap test, and used FDH as other nodes for accurately determine the contact status between leaves in closer proximity. Finally, based on leaf morphological architecture, reasonable and efficient solutions for collision response were presented. Further results proved that the algorithm was efficient for realizing leaves collision simulation.

**Keywords** Crop visualization, Collision detection, Collision response, Surface subdivision, Hierarchical bounding volume

随着虚拟作物研究与应用的深入,虚拟作物的精度及效果要求也越来越高。在作物冠层的三维重建中,存在着叶片等器官相互碰撞的问题。为了保证模拟的真实感,需要在作物可视化系统对叶片进行碰撞检测,并根据碰撞情况做出相应的处理,如对叶片的形状与位置做相应的调整等,避免叶片间产生相互穿透的现象,以增强可视化的真实感。在作物可视化过程中,由于非均匀有理 B 样条(NURBS)方法同时具有有理样条和非均匀样条的性质,既能描述自由型曲线、曲面,又能精确表示二次曲线弧和二次曲面,并且通过控制点和权因子来灵活地改变形状,因此 NURBS 曲面常被用于叶片等器官的形态建模<sup>[1,2]</sup>。国内外许多专家和学者已在碰撞检测方面开展了不少有价值的研究工作,但大都是针对多面体

模型,而较少涉及直接对参数曲面(如 NURBS 曲面)表示的模型进行相交检测,且应用领域多为计算机图形学、虚拟现实和机器人、CAD/CAM 等<sup>[3-6]</sup>,在虚拟作物方面还少见报道。因此,基于 NURBS 曲面,研究建立作物主要器官叶片间的碰撞检测及响应方法,对于提高虚拟作物的精度及效果具有重要意义。

本文研究的目的是探索以 NURBS 曲面表示的作物叶片间的碰撞检测及响应,给出一种基于曲面分割技术及层次包围盒树,实现 NURBS 曲面碰撞检测的方法,并针对不同的叶片间碰撞情况,根据作物叶片形态变化规律,提出一种合理的冲突响应方法,从而获得较为真实的作物生长仿真效果,为构建作物生长可视化系统提供关键技术。

到稿日期:2010-11-22 返修日期:2011-03-22 本文受国家“863”计划项目(2007AA10Z225,2006AA10Z230),国家自然科学基金资助项目(30971697),江苏省科技支撑计划资助项目(BE2009342)资助。

伍艳莲(1970—),女,博士,主要研究方向为计算机图形学和虚拟作物,E-mail:wuyyl@njau.edu.cn;汤 亮(1979—),男,博士,主要研究方向为作物模拟与数字农作;曹卫星(1958—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为信息农学;朱 艳(1976—),女,教授,博士生导师,主要研究方向为数字农作技术。

# 1 叶片几何模型

本文以小麦作物为研究对象,叶片模型用 NURBS 曲面<sup>[7]</sup>来构建。在  $u$  向为  $p$  次、 $v$  向为  $q$  次的 NURBS 曲面可表示如下:

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m w_{i,j} P_{i,j} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v)}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m w_{i,j} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v)}, 0 \leq u, v \leq 1 \quad (1)$$

式中,  $P_{i,j}$  为控制顶点,  $w_{i,j}$  为权因子,  $N_{i,p}(u)$  和  $N_{j,q}(v)$  分别为基于如下节点矢量的 B 样条基函数:

$$U = \{ \underbrace{0, \dots, 0}_{p+1}, u_{p+1}, \dots, u_{r-p-1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{p+1} \}$$

$$V = \{ \underbrace{0, \dots, 0}_{q+1}, v_{q+1}, \dots, v_{s-q-1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{q+1} \}$$

$$r = n + p + 1, s = m + q + 1$$

小麦叶片的曲面网格模型使用双三次 NURBS 曲面 ( $p=q=3$ ), 权因子  $w_{i,j} (i=0, 1, \dots, n; j=0, 1, \dots, m) = 1$ , 将叶长方向定为  $u$  向, 叶宽方向定为  $v$  向, 由小麦叶片形态结构的描述参数<sup>[8]</sup> (如叶片长、叶宽、茎叶夹角等) 确定小麦叶片的控制点  $P_{i,j} (i=0, 1, \dots, n; j=0, 1, \dots, m)$ , 所有控制点形成一个控制网格。根据式(1), 由所求得的控制顶点和节点矢量即可构造出叶片曲面模型。图 1 为使用上述方法建立的小麦叶片模型的线框图。

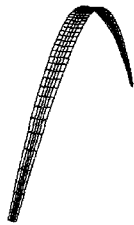


图 1 小麦叶片模型线框图

## 2 叶片间碰撞检测算法

### 2.1 算法的基本思想

在 2 个几何模型间碰撞检测的基本方法大致可分为 2 类<sup>[9]</sup>: 空间分解法和层次包围盒方法。这 2 类算法都使用了层次结构模型, 其目标都是尽可能地减少需进行相交测试的几何对象对的数目。其中, 层次包围盒方法应用得更为广泛, 适用于复杂环境中的碰撞检测。本文采用层次包围盒方法来实现 NURBS 曲面表示的小麦叶片间碰撞检测。首先, 通过节点插入技术, 针对小麦叶片形态特点, 将曲面一分为二。然后, 兼顾碰撞检测的速度与精度, 结合轴向包围盒 AABB<sup>[10]</sup> 和固定方向凸包 FDH<sup>[11]</sup> 的特点, 为分割后的叶片曲面建立一种混合层次包围盒树: AABB-FDH。其中, 根节点采用简单的 AABB 包围盒, 以快速排除不可能相交的叶片; 其它层节点采用紧密性更好的 FDH 包围盒, 以保证精确地判定距离较近的叶片间碰撞状态。最后, 基于遍历叶片对的混合层次包围盒树来检测叶片之间的碰撞情况。

因此, 叶片间的碰撞检测算法主要包括 3 个过程: NURBS 曲面分割; 构建基于曲面分割的 AABB-FDH 混合层次包围盒树; 基于遍历叶片对的混合层次包围盒树检测叶片之间的碰撞情况。

### 2.2 NURBS 曲面分割

NURBS 曲面的分割可以通过插入节点算法来实现, 所

插入的节点可以是已有节点, 也可以不是已有节点。为便于叙述, 先讨论 NURBS 曲线的分割。

设  $C(u)$  为定义在  $U = \{u_0, u_1, \dots, u_m\}$  上的 NURBS 曲线, 令  $\bar{u} \in [u_k, u_{k+1})$ , 将  $\bar{u}$  插入到  $U$  中, 构造新的节点矢量:

$$\bar{U} = \{u_0, u_1, \dots, u_k, \bar{u}, u_{k+1}, \dots, u_m\}$$

根据节点插入算法<sup>[7]</sup>, 可得新的控制顶点:

$$P_i^1 = a_i P_i + (1 - a_i) P_{i-1}$$

$$a_i = \begin{cases} 1, & i \leq k - p \\ \frac{\bar{u} - u_i}{u_{i+p} - u_i}, & k - p + 1 \leq i \leq k \\ 0, & i \geq k + 1 \end{cases}$$

当重复插入节点  $\bar{u}$  直至具有重复度  $p$  时, 节点矢量成为  $\bar{U}^p = \{u_0, u_1, \dots, u_k, \bar{u}, \dots, \bar{u}, u_{k+1}, \dots, u_m\}$ ,  $\bar{u}$  具有重复度  $p$ , 可将原来的样条曲线在  $\bar{u}$  处分裂为两段, 并分别用各自的控制顶点和节点矢量来定义。

对于 NURBS 曲面, 采用相似的方法处理, 分别在  $u, v$  向插入节点, 可将 NURBS 曲面一分为四。由于小麦叶片在长度方向上的尺度远远大于叶片宽度方向上的尺度, 因此本文对叶片曲面分割时采用二叉树方法, 首先沿叶片长度方向进行分割, 分割到一定精度, 再考虑沿叶宽方向进行分割。如图 2 所示, 运用 NURBS 曲面的节点插入算法一次将 NURBS 曲面沿叶长方向一分为二。

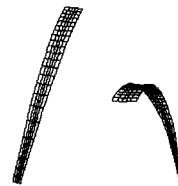


图 2 分割后的小麦叶片曲面

### 2.3 包围盒基本方法的描述

为了尽早排除不可能碰撞的情况, 曲面在每一次分割后都需要为其建立包围盒。常见的包围盒有轴向包围盒 AABB (Axis-Aligned Bounding Box)、包围球 (Spheres)、固定方向凸包 FDH (Fixed Direction Hull)、有向包围盒 OBB (Oriented Bounding Box) 等<sup>[10-15]</sup>。

#### 2.3.1 AABB 包围盒

AABB 沿坐标轴的包围盒<sup>[10,15]</sup>, 是一个包含几何对象且各边平行于坐标轴的最小六面体。设  $l_x, h_x, l_y, h_y, l_z, h_z$  分别是该 AABB 在  $x, y, z$  坐标轴上投影的最小和最大坐标值, 则 AABB 可表示为  $R = \{(x, y, z) | l_x \leq x \leq h_x, l_y \leq y \leq h_y, l_z \leq z \leq h_z\}$ 。因此, 给定对象的 AABB 计算简单, 只需分别计算对象中各个元素的顶点的  $x$  坐标、 $y$  坐标和  $z$  坐标的最大值和最小值。

建立对象的包围盒之后, 可进行包围盒相交测试。AABB 包围盒间的相交测试比较简单, 可以通过它们在 3 个坐标轴上的投影区间的重叠测试来完成, 只要两个 AABB 包围盒在某个坐标轴上的投影区间不重叠, 就可以判定它们是不相交的; 如果它们在 3 个坐标轴上的投影区间都重叠, 则认为它们是相交的。

#### 2.3.2 包围球

包围球定义为包含物体的最小的球体<sup>[12]</sup>。计算给定对象  $E$  的包围球, 首先需分别计算  $E$  中各个元素的顶点的  $x$  坐

标、 $y$  坐标和  $z$  坐标均值以确定包围球的球心  $c$ ，再由球心与 3 个最大值坐标所确定的点间的距离计算半径  $r$ 。包围球间的相交测试也相对比较简单。但是包围球的紧密性在所有包围盒类型中是比较差的，它除对在 3 个坐标轴上能分布比较均匀的几何体外，其余几乎都会留下很大的空隙，尤其是对于细长的物体（如本文的研究对象小麦叶片）。相对于 AABB 而言，在大多数情况下包围球无论是紧密性还是简单性都有所不如。

### 2.3.3 FDH 包围盒

固定方向凸包 FDH 是一种特殊类型的凸包<sup>[11,15]</sup>，它的所有面的法向量均来自一个固定的方向集合。它不仅继承了凸包紧密性好的优点，而且是一种简单的包围盒。一个几何对象  $X$  的 FDH 包围盒完全可以由它在固定方向集合中的各个方向向量上的最大延伸所确定，故  $X$  的 FDH 的计算可以通过  $X$  的顶点与固定方向集  $D$  中的各个方向的最大点积得到。

FDH 包围盒间的相交测试可以通过投影区间的重叠测试来完成，只要两个 FDH 包围盒在  $D$  中某一个方向对上的投影区间不重叠，就可以判定它们是不相交的；如果它们在  $D$  中所有方向对上的投影区间都重叠，则认为它们是相交的。

### 2.3.4 OBB 包围盒

OBB 包围盒定义为包含几何对象且相对于坐标轴方向任意的最小长方体<sup>[13-15]</sup>。OBB 包围盒的特点是方向的任意性，因此它可以根据被包围对象的形状特点尽可能紧密地包围对象。OBB 包围盒构造的关键问题在于包围盒最佳方向的确定，最佳方向必须保证在该方向上包围盒的尺寸最小。

OBB 包围盒的相交测试是基于分离轴的理论<sup>[13]</sup>，尽管 OBB 包围盒紧密性是最好的，但包围盒的建立和相交测试的代价比较大，在解决实时性检测问题时还稍显不足。

### 2.4 包围盒的选择

包围盒的选择需要兼顾简单性和紧密性，因此本文根据以上分析的几种常见包围盒的特点，在碰撞检测速度和精度上权衡，采用轴向包围盒 AABB 和固定方向凸包 FDH 来建立混合层次包围盒树，在混合层次包围盒树的顶层采用简单的 AABB 包围盒，以尽快排除不可能发生碰撞的情况，并在树的其它层次采用紧密性好但稍复杂的 FDH 包围盒，以保证碰撞检测的速度和精度。

在建立 NURBS 曲面的 AABB 包围盒时，由于 NURBS 曲面的凸包性，叶片曲面的 AABB 可通过计算曲面的控制点在 3 个坐标轴  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上投影的最小和最大坐标值得到，从而简化计算过程。

同样在建立 NURBS 曲面的 FDH 包围盒时，类似于 AABB 包围盒，为简化计算过程，由于 NURBS 曲面的凸包性，NURBS 曲面的 FDH 可通过计算曲面的控制点与  $D$  中各个方向的点积得到。本文取  $D_{14} = \{\pm(1,0,0), \pm(0,1,0), \pm(0,0,1), \pm(1,1,1), \pm(1,-1,1), \pm(1,1,-1), \pm(1,-1,-1)\}$ ，然后计算叶片 NURBS 曲面的控制点  $P_{i,j}$  与固定方向集  $D$  中各个方向的最大点积，从而得到 NURBS 曲面的 FDH 包围盒。

### 2.5 AABB-FDH 混合层次包围盒树的构建

检测 2 张叶片间碰撞时，利用包围盒来进行碰撞检测。一张叶片可分割成两个子曲面，这些子曲面又可递归地分割

成更小的部分，对叶片及其子部分都建立其包围盒，然后将这些包围盒组成层次结构，建立其包围盒树来加快检测速度。根据 2.2 节介绍的 NURBS 曲面分割技术可将叶片一分为二，因此本文将二叉树作为层次包围盒树，树的深度  $L$  可以根据实际应用中检测的时间和精度的需求来确定。

AABB 包围盒构建简单快速、相交测试简单，但紧密性差；FDH 包围盒紧密性较好，但构造和相交测试相对较复杂。因此本文结合 AABB 和 FDH 的特点，建立了一种混合层次包围盒树：AABB-FDH。在树的顶层采用 AABB 包围盒，其它层采用 FDH 包围盒，并采用从顶向下的方法递归建立层次包围盒树。首先根据叶片的控制顶点求出整张叶片的 AABB 包围盒，并将其作为层次包围盒树的根节点，以尽快排除不可能相交情况（如相距较远的叶片）；然后按照 NURBS 曲面分割的规则将叶片曲面分成两个部分，分别建立每个部分的 FDH 包围盒和相应的节点，将这些新节点作为根节点的左、右子节点；依次按照第二步的方法分割每个子节点对应的叶片曲面，递归地建立层次包围盒树。算法描述如下：

```

CreateTree(Node n, Leaf A, Split Method CL) {
/* 采用 NURBS 曲面分割技术 CL 将叶片 A 分割为: A1、A2, 并分别为 A1、A2 建立节点, 记为 n1、n2 */
CreateNode(n) /* 生成层次包围盒树的根节点 */
CreateTree(n1, A1, CL)
CreateTree(n2, A2, CL)
}

```

### 2.6 基于 AABB-FDH 混合层次包围盒树的碰撞检测算法

当两张叶片的混合层次包围盒树建立之后，可以通过遍历两棵包围盒树对每对包围盒执行重叠测试，以判断两个包围盒是否相交。当两个包围盒不相交时，以该包围盒为根节点的子树不用继续检测；当两个包围盒相交时，需要对该节点的孩子节点进行检测。对于作物可视化系统，一般只需近似模拟碰撞情况，并不要求碰撞检测达到 100% 精确。若两张叶片实际未发生碰撞，当其距离比较近时就可以认为已发生了碰撞。在实际应用中，树的深度  $L$  选择适当时，当检测到两个相交的叶节点包围盒时，可不再进行基本几何元素相交检测，就认为两张叶片发生了碰撞。因此，基于混合层次包围盒树的小麦叶片碰撞检测算法可描述如下：

```

detect_collision(treeA, treeB) {
/* treeA 和 treeB 是 A、B 两叶片的层次包围盒树的根节点 */
if (treeA ∩ treeB! = ∅) /* treeA 与 treeB 两个包围盒相交 */
if (treeA 是叶子节点)
if (treeB 是叶子节点)
发生碰撞
else
detect_collision (treeA, treeB 的左子节点)
detect_collision (treeA, treeB 的右子节点)
end if
else
detect_collision (treeA 的左子节点, treeB)
detect_collision (treeA 的右子节点, treeB)
end if
end if }

```

### 3 叶片间碰撞响应

在作物可视化中，当检测出碰撞发生时，必须及时地对碰

撞进行处理,以逼真地模拟现实中作物的生长过程。对于小麦叶片之间这种碰撞情况,可以根据叶片的生长状态和形态变化规律<sup>[8]</sup>,通过指定反应方向,来合理改变叶片的当前状态,对叶片的形状与位置做相应的调整,避免发生叶片间的相互穿透现象。根据田间实验观察,一般情况下,在同一主茎或分蘖上不同叶位叶片间较难发生碰撞,因此本文着重讨论在不同主茎或分蘖上叶片间的碰撞。

设发生碰撞的两张叶片 A、B 在地面上的投影分别为 A'、B',呈一夹角  $\theta$ ,根据夹角  $\theta$  的大小可以把碰撞及响应情况粗略分为以下 3 种:

(1) 夹角  $\theta$  接近  $90^\circ$ 。即发生碰撞的两张叶片在地面上的投影几乎相互垂直,对于这种情况,可以改变两张叶片的茎叶夹角(叶片与茎秆之间的夹角)来对碰撞做出响应,使上面叶位叶片的茎叶夹角  $\alpha$  变小,下面叶位叶片的茎叶夹角  $\beta$  变大,从而避免碰撞,如图 3(a)所示。

(2) 夹角  $\theta$  接近  $180^\circ$  或  $0^\circ$ 。即发生碰撞的两张叶片在地面上的投影几乎相互平行或在一直线上。对于这种情况,可以对碰撞叶片的方位角  $\phi$  做小范围的调整来避免碰撞,如图 3(b)所示。

(3) 其它情况。这种情况的碰撞响应相对比较复杂,可以根据碰撞实际情况,通过改变碰撞叶片的茎叶夹角、方位角或使叶片发生卷曲变形来避免碰撞。

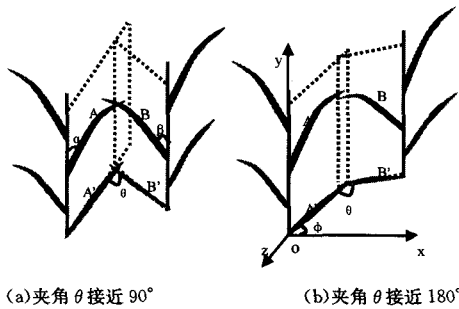


图 3 小麦叶片碰撞响应示意图

#### 4 算法应用实例

在 IBM IntelliStation Z Pro 图形工作站 (Intel Xeon 3.2GHz CPU, NVIDIA QUADRO FX 1400 显卡, 80G 硬盘, 1G 内存) 上基于 Windows 平台, 使用 Visual C++. net 为开发工具, OpenGL 为图形平台实现了本文的碰撞检测算法, 算法的测试场景如图 4 所示。当两张叶片慢慢靠近时, 即发生碰撞。算法检测到碰撞后, 碰撞面显示为红色。由此可见, 算法能较准确地检测出叶片之间是否有碰撞。



图 4 叶片的碰撞检测场景

算法在作物可视化系统中的应用实践证明, 算法可有效地检测和处理作物叶片的相互碰撞。图 5(a) 是未应用本算法的小麦可视化效果图, 其中小麦叶片之间有交叉现象, 导致可视化效果较差。图 5(b) 为经过本文算法进行碰撞检测及

响应处理后的虚拟显示, 效果大大改善。

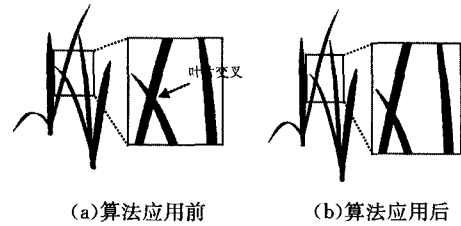


图 5 碰撞检测与响应算法的应用实例图

**结束语** 本文针对以 NURBS 曲面表示的作物叶片, 提出了一种作物叶片间碰撞检测及响应的方法。首先, 根据小麦叶片形态特点, 采用二叉树方法分割叶片曲面, 从而避免了传统二叉树分割方法会产生较为琐碎的分割, 造成一定的时间、空间浪费; 进而结合 AABB 包围盒简单、FDH 包围盒紧密性较好的优点, 建立了 AABB-FDH 混合层次包围盒树, 可快速排除如两叶片相距较远而基本上不可能发生碰撞的情况, 或者把可能碰撞的目标锁定在很小的范围内而提高碰撞检测速度。其次, 根据小麦叶片的形态变化规律, 提出了较合理有效的冲突响应机制, 尽量保证叶片间不产生位置冲突。最后, 以实验证明本文提出的作物叶片间冲突检测及响应算法, 能够较好地满足作物可视化系统所需的真实感要求。

应用实例表明, 本文方法是可行的, 但仍存在一些不足。由于作物实际生长过程中叶片间碰撞情况的复杂性, 难以对各种碰撞情况进行符合叶片形态变化规律的精确响应; 同时, 虽然本文方法中有一些优化的方法, 但还需对方法做进一步改进完善, 以提高其效率。这些都是今后要继续研究的方向。

#### 参考文献

- [1] 杨娟, 赵明, 潘学标. 基于 NURBS 曲面的棉花器官建模[J]. 计算机工程与应用, 2005, 185-188
- [2] 刘晓东, 曹云飞, 刘国荣, 等. 基于 NURBS 曲面的水稻叶形态建模[J]. 微电子学与计算机, 2004, 21(9): 117-124
- [3] 李学庆, 孟祥旭, 汪嘉业, 等. 基于启发式搜索分离向量的凸多面体碰撞检测[J]. 计算机学报, 2003, 26(7): 837-847
- [4] Teschner M, Kimmerle S, Heidelberger B, et al. Collision detection for deformable objects [J]. Computer Graphics Forum, 2005, 24: 101-110
- [5] Govindaraju NK, Knott D, Jain N, et al. Interactive collision detection between deformable models using chromatic decomposition[J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 991-999
- [6] 刘智斌, 李占利, 曹宝香. 虚拟环境中织物的碰撞检测及响应[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(7): 1497-1499
- [7] 潘云鹤, 董金详, 陈德人. 计算机图形学——原理、方法及应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 211-219
- [8] 陈国庆, 朱艳, 曹卫星. 冬小麦叶片生长特征的动态模拟[J]. 作物学报, 2005, 31(11): 1524-1527
- [9] 石教英. 虚拟现实基础及实用算法[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 216-218
- [10] Van Den B. Efficient collision detection of complex deformable models using AABB trees[J]. Journal of Graphics Tools, 1997, 2(4): 1-13

(下转第 284 页)

进程的优化摆放结果。

图 10 对比 Round-Robin 与优化进程摆放后, NAS 基准中 BT、CG 等基准(class C)的节点内通信率的对比, 优化后的进程摆放策略能有效提高节点内的通信率。虽然通过合理的进程摆放能提高 MPI 程序节点内的通信率, 但进一步提升 MPI 程序的性能还需要进一步提高 cache 的利用率。

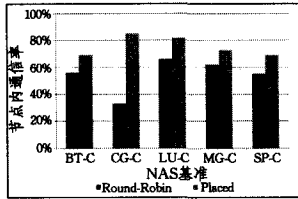


图 10 两种不同进程摆放策略下 NAS 基准全局节点内通信率对比

**结束语** 多核机群的存储层次化使得多核机群具有与传统的 SMP 平台显著不同的特征, 因此, 未经优化直接运行在多核机群上的 MPI 并行程序无法得到最优的性能。本文在对比了多核机群性能特征的基础上, 实验分析了几种可行的、具有普遍意义的 MPI 程序优化技术。实验证明, 这几种方法对多核机群下 MPI 程序的性能提升具有一定的有效性和通用性。后续工作将继续研究多核机群下 MPI 程序可能的优化空间, 例如多核机群下 MPI 集合通信的优化等。

### 参 考 文 献

[1] Chai L, Lai P, Jin H W, et al. Designing an efficient kernel-level and user-level hybrid approach for mpi intra-node communication on multi-core systems[C]//ICPP '08: Proceedings of the 2008 37th International Conference on Parallel Processing. Washington, DC, USA, IEEE Computer Society, 2008

[2] TOP500 Team[R]. TOP500 Report for June 2009. <http://www.top500.org>

(上接第 266 页)

[11] Klosowski J T, Held M, Mitchell J S B, et al. Efficient collision detection using bounding volume hierarchies of k-Dops[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1998, 4(1): 21-36

[12] Hubbard P M. Approximating polyhedra with spheres for time critical collision detection[J]. ACM Transactions on Graphics, 1996, 15(3): 179-210

[13] Gottschalk S, Lin M C, Manocha D. OBB Tree: a hierarchical

(上接第 272 页)

[3] 钱振兴, 程义民, 谢春辉, 等. 基于嵌入矩阵的二值图像隐藏方法[J]. 电路与系统学报, 2008, 13(6): 128-131

[4] 谢建全, 阳春华, 谢勃, 等. 一种大容量的二值图像信息隐藏算法[J]. 小型微型计算机系统, 2008, 29(10): 1874-1877

[5] 王国新, 平西建, 张涛, 等. 空域 LSB 信息伪装及其隐写分析[J]. 计算机工程, 2008, 34(1): 173-174, 189

[6] 王继军, 张显全, 韦月琼. 基于 LSB 的数字图像分存隐藏算法[J]. 计算机工程, 2008, 29(23): 6167-6169

[3] MPI: A Message-Passing Interface Standard[S]. <http://www.mpforum.org/docs/mpi-11-html/mpi-report.html>

[4] Tu Bi-bo, Zou Ming, Zhan Jian-feng, et al. Multi-core Aware Optimization for MPI Collectives, poster[C]//The 2008 IEEE International Conference on Cluster Computing (Cluster 2008). Tsukuba, Japan, 29 September-1 October, 2008

[5] Rabenseifner R, Hager G, Jost G. Hybrid MPI/OpenMP Parallel Programming on Clusters of Multi-Core SMP Nodes[C]//Didier El Baz, et al., eds. Proceedings of the 17th Euromicro International Conference on Parallel, Distributed, and Network-Based Processing (PDP 2009). Weimar, Germany, Computer Society Press, Feb. 2009; 427-236

[6] Chaarawi M, Squyres J M, Gabriel E, et al. A tool for optimizing runtime parameters of open mpi[C]//Proceedings of the 15th European PVM/MPI Users' Group Meeting on Recent Advances in Parallel Virtual Machine and Message Passing Interface. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2008; 210-217

[7] Pellegrini S, Wang Jie, Ahringer T, et al. Optimizing MPI Runtime Parameter Settings by Using Machine Learning[C]//Proceedings of the 16th Euro PVM/MPI Users' Group Meeting on Recent Advances in Parallel Virtual Machine and Message Passing Interface. Espoo, Finland, 2009

[8] Solt D. A profile based approach for topology aware MPI rank placement[OL]. [http://www.tlc2.uh.edu/hpcc07/Schedule/speakers/hpcc\\_hp-mpi\\_solt.ppt](http://www.tlc2.uh.edu/hpcc07/Schedule/speakers/hpcc_hp-mpi_solt.ppt), 2007

[9] Mercier G, Clet-Ortega J. Towards an Efficient Process Placement Policy for MPI Applications in Multicore Environments[C]//Proceedings of the 16th Euro PVM/MPI Users' Group Meeting on Recent Advances in Parallel Virtual Machine and Message Passing Interface. Espoo, Finland, 2009

structure for rapid interference detection[C]//The Proceedings of SIGGRAPH. 1996; 171-180

[14] Ramirez E, Navarro H, Carmona R, et al. Optimizing Collision Detection Based on OBB Trees Generated with Genetic Algorithm[C]//IV Iberoamerican Symposium in Computer Graphics-SIACG. 2009; 1-7

[15] Fares C, Hamam Y. Collision detection for rigid bodies: A state of the art review[C]//GraphiCon. 2005

[7] 侯整风, 高汉军. 一个新的基于多重秘密共享的图像隐藏方案[J]. 计算机应用, 2008, 28(4): 902-905

[8] LIBAI. Areliable( $k, n$ ) image secretsharing scheme[C]//2nd IEEE International Symposium on Dependable, Autonomic and Secure Computing Indianapolis, Indiana, USA; IEEE Press, 2006; 31-36

[9] 杨全周, 蔡晓霞, 陈红. 一种基于游程编码的二值图像隐藏方案[J]. 舰船电子对抗, 2008, 31(2): 86-88