

文章编号:1000-582X(2011)01-021-05

大型高功率激光装置下装系统的碰撞检测

谢志江¹, 刘其南¹, 袁晓东², 李 诚¹

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要:分析了大型高功率激光装置在线可替换单元装校过程的特殊性,建立了基于区域划分的下装系统的方向包围盒,在包围盒的计算中引入闵可夫斯基和的概念,并在其基础上对分离轴的选择进行优化组合,结合碰撞的局部性原理,构建了一种动态的 OBB(Oriented Bounding Box)层次树检测方法,经过中国大型高功率激光装置下装系统的装校仿真实践,结果表明这种划分区域的连续检测方法高效可靠。

关键词:惯性约束聚变;闵可夫斯基和;包围盒;在线可替换单元;碰撞;检测

中图分类号:TP391 ;TH122

文献标志码:A

Collision detection for down-load system in large-scale superpower laser facility

XIE Zhi-jiang¹, LIU Qi-nan¹, YUAN Xiao-dong², LI Cheng¹

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, P. R. China)

Abstract: The particularity of the assembly and rectification processing of line-replaceable unit (LRU) in large-scale superpower laser facility is analyzed. Oriented bounding box (OBB) of down-load system, which is based on space region partition, is set up, and Minkowski sum is introduced into OBB calculation. Then the separating axis theorem is optimized, and a dynamic OBB hierarchy tree detecting method is created by combining locality principle of collision. The results from the assembly and rectification practice in a large-scale superpower laser facility confirm that the method is highly efficient and reliable.

Key words: ICF (inertial confinement fusion); Minkowski sum; OBB; LRU; collision; detection

惯性约束聚变(Inertia Confinement Fusion, ICF)是产生聚变反应的一种方法,要实现 ICF 必须提供高能量的激光束。大型激光器装置如美国的国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)和中国类似的大型高功率激光装置所需的大口径光学元件与相应机械件组合构成的在线可替换单元(Line-Replaceable Unit, LRU)数目和种类繁多、规格不一,均为专门定制的易损、精密且价格昂贵的重要关

键部件。能否在保证绝对安全的前提下进行装校,直接影响到装置的工程建设与运行维护成本。为此在正式安装前必须做相应的仿真测试,装校过程中也必须要防碰撞检测方法。

Minkowski Sum 在计算几何中的一个最主要运用就是机器人学的运动规划,目前国内外研究的热点主要集中在基于顶点的凸或非凸多面体的高效算法上。文献[1-2]主要着眼于用点代替基于网格

收稿日期:2010-08-15

基金项目:国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金资助项目(10976034)

作者简介:谢志江(1963-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事机械创新设计、设备监测诊断等研究工作,

(E-mail) xzj99@vip. sina. com。

的凸多面体的精确闵和边界计算,文献[3-4]着重点为算法的效率与优化,而文献[5-7]关注的焦点则为凸多面体闵和的精确高效构造与分解计算。考虑到所用硬件环境及三维环境中的包围盒的闵可夫斯基和计算量较大,笔者将其引入但回避其计算的复杂性,借助其概念来对包围盒的分离轴选择进行优化组合,并以此构建动态 OBB (Oriented Bounding Box) 层次树的连续碰撞检测算法,减少碰撞检测的计算开销,增强实时性,实现了大型高功率激光装置下装装校系统的全局连续碰撞检测。

1 相关研究

碰撞检测在几何上表现为两个多面体的求交测试问题,其算法大体可分为空间剖分法、距离跟踪法和包围盒层次法三大类。其中包围盒层次法的核心思想是用体积略大而几何特性简单的包围盒(如 AABB(Axis Aligned Bounding Box)、OBB 等)来近似地描述复杂的几何对象,在碰撞检测的最初阶段,通过对相对简单的包围盒进行相交测试,以排除不可能发生碰撞的物体,从而起到加速的作用。然而 ICF 装置环境与一般虚拟现实系统相比有其特殊性,即虽然场景范围大,模块种类与数量繁多,但可运动的模块数量及运动的空间区域尺度有严格限制,在某一时刻真正发生碰撞的对象并不多。若在每一时刻都要对所有对象进行包围盒树之间的两两相交测试,将会浪费大量的检测时间,为降低计算开销并确保检测的实时与精确,有必要进行区域的划分,尽可能地降低检测过程中的运算量。

空间划分技术的目的就是要减小碰撞检测的运算开销。它利用运动物体的时空局部性,将空间按照一定的规则划分为一系列子空间,只对同一子空间内的部分进行相交测试。相关文献对此提出了一系列的算法研究与分析。选择高效的分离轴组合进行测试,以及在包围盒树中运用连续碰撞的局部性原理等也同样能降低计算量,减少不必要的基本图元间的相交检测^[8]。上述这些方法可为 ICF 装置环境中下装装校系统的碰撞检测所借鉴。

2 检测区域的划分

小范围内进行的碰撞检测由于对象数量较少,包围盒之间的碰撞检测计算开销很小,但对象 ICF 装置环境这种大范围内的碰撞检测,各类 LRU 数量众多,包围盒之间碰撞检测的计算开销是模型数量的平方与组成每个模型的面片数平方之积,其运算负荷将会非常巨大,实时性与精确性无法保证。

假设 ICF 装置环境中待检测对象中有 m 个运动和 n 个静止,则不分区情况下碰撞检测的运算开销应为 $m(m+n-1)$;如把这 m 个运动对象和 n 个静止对象分别按照空间划分至 k 个子区域,相应每个子区域中的待检测对象的数量分别为 m_i 和 n_i ,则有

$$\sum_{i=0}^k m_i = m, \sum_{i=0}^k n_i = n, \text{根据 Cauchy 不等式有:}$$

$$mm = \sum_{i=0}^k m_i \sum_{i=0}^k n_i = \sum_{i=0}^k m_i n_i + \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k m_i n_j \geq \sum_{i=0}^k m_i n_i, \quad (1)$$

$$mm \geq \sum_{i=0}^k m_i m_i = \sum_{i=0}^k m_i^2, \quad (2)$$

$$\sum_{i=0}^k (m_i (m_i + n_i - 1)) = \sum_{i=0}^k m_i n_i + \sum_{i=0}^k m_i^2 - \sum_{i=0}^k m_i, \quad (3)$$

$$m(m+n-1) = m^2 + mm - m \geq \sum_{i=0}^k m_i n_i + \sum_{i=0}^k m_i^2 - m. \quad (4)$$

式(3)为划分区域后待测对象的运算总开销,由式(4)可知进行区域划分后待碰撞检测对象总数的计算开销将会降低。如果出现待检测对象都集中在某一个子区域中,而其他的子区域里面都没有待测对象,此种特例就意味着碰撞检测问题集合仍维持着原来的规模并未降低,但具体到本例不存在此种情况。上述阐述说明空间子区域划分方法可降低由模型数量所带来的计算开销,以及碰撞检测问题运算效率的提高。在对象这一层次与仅针对包围盒算法进行的优化其计算开销之减少有数量级的差异。

3 基于 OBB 的连续碰撞检测

层次包围盒法是一种典型的空间数据结构,适合复杂环境中的碰撞检测。其设计理念是避免对所有几何基元进行穷举式碰撞测试。这种方法是把复杂的几何对象用简单的包围盒近似地描述,进而构造树状层次结构进行逼近对象的几何模型,最后几乎完全获得对象的几何特性。在各种碰撞检测算法中,它被证明目前是效率最高的,可用式(5)表示为

$$T = N_v \times C_v + N_p \times C_p, \quad (5)$$

式中: T 为执行总时间; N_v 为待检测的包围盒数; C_v 为每对包围盒测试所耗时间; N_p 为待检测的基本图元数; C_p 为每对基本图元的检测时间。式(5)清楚地显示了碰撞检测时间主要取决于两个因素:包围盒的简单性与紧密性。其中第 1 个因素与 C_v 相关,

而第 2 个因素直接与 N_o 和 N_p 相关。为减少执行总时间可从两个方面着手,一是在对象层级进行分区剔除以减少不必要的计算开销,如前述的区域划分方法;另外一个就是减少包围盒相交测试的时间,如下面将要阐述的基于闵可夫斯基和的优化的分离轴选择。

3.1 OBB 的计算

一个给定对象的 OBB 被定义为包含该对象且相对于坐标轴方向任意的最小的长方体。其计算的关键是寻找最佳方向,确定在该方向上包围对象的包围盒的最小尺寸。将被包围对象中的基本图元三角形的顶点集合看作是变量的概率分布函数,则在对 OBB 进行计算时,可利用三角形顶点的均值和协方差矩阵来计算其位置与方向。为避免对象模型内部可能的孔洞与所包含的三角形面积的大小不一引起的包围盒的偏心与紧密性不好现象,有必要对其进行加权平均,具体构造步骤如下:

1) 计算协方差矩阵 C : 假设对象模型中第 i 个三角形顶点的坐标为 (p^i, q^i, r^i) , 该三角形的面积为 A^i , 则模型的表面积为所包含三角形的面积之和, 记为 A^H , 则 $A^i = \frac{1}{2} |(q^i - p^i) \times (r^i - p^i)|$ 和

$A^H = \sum_{i=1}^n A^i$, 第 i 个三角形的质心记为 m^i , 则 $m^i = \frac{1}{3} (p^i + q^i + r^i)$ 。对象模型的质心为模型所包含的全部三角形质心的加权平均, 记为 m^H , 其权值为三角形的面积, 则 $m^H = \frac{1}{A^H} \sum_{i=1}^n A^i m^i$, 其协方差矩阵为

$$C = \sum_{i=1}^n \frac{A^i}{12} (9m_j^i m_k^i + p_j^i p_k^i + q_j^i q_k^i + r_j^i r_k^i) - m_j^H m_k^H A^H, \quad (6)$$

其中 $1 \leq j, k \leq 3$ 。

2) 求出协方差矩阵 C 的特征向量, 并将求出的这 3 个特征向量进行施密特正交单位化, 将单位化后的特征向量作为对象包围盒 OBB 的 3 个局部坐标轴向 A_x 、 A_y 和 A_z ; 假设协方差矩阵 C 的 3 个特征向量为 c_1 、 c_2 和 c_3 , 则:

$$\begin{aligned} A_x &= \frac{c_1}{c_1}, \\ A_y &= \frac{c_2 - \langle c_2 \cdot A_x \rangle A_x}{c_2 - \langle c_2 \cdot A_x \rangle A_x}, \\ A_z &= \frac{c_3 - \langle c_3 \cdot A_x \rangle A_x - \langle c_3 \cdot A_y \rangle A_y}{c_3 - \langle c_3 \cdot A_x \rangle A_x - \langle c_3 \cdot A_y \rangle A_y}. \end{aligned} \quad (7)$$

3) 将对象模型的所有顶点 v^i 向这 3 个轴进行投影, 根据投影计算出其在 3 个轴向上的最大值 u_x 、 u_y 、 u_z 和最小值 w_x 、 w_y 、 w_z , 用这些值来确定方向包围盒 OBB 的大小;

$$\begin{aligned} u_x &= \max(\text{Project}\langle A_x \cdot v^i \rangle), \\ u_y &= \max(\text{Project}\langle A_y \cdot v^i \rangle), \\ u_z &= \max(\text{Project}\langle A_z \cdot v^i \rangle), \\ w_x &= \min(\text{Project}\langle A_x \cdot v^i \rangle), \\ w_y &= \min(\text{Project}\langle A_y \cdot v^i \rangle), \\ w_z &= \min(\text{Project}\langle A_z \cdot v^i \rangle). \end{aligned} \quad (8)$$

4) 计算方向包围盒 OBB 的中心 μ :

$$\mu = \frac{1}{2} ((u_x + w_x)A_x + (u_y + w_y)A_y + (u_z + w_z)A_z). \quad (9)$$

3.2 基于闵可夫斯基和的分离轴选择

三维空间中如果存在一个向量, 使得被检测的几何体在该轴上的投影不相交, 那么这根轴就是一根分离轴。如果找不到分离轴, 那么被检测的几何体相交^[9]。在实际相交测试的时候, 只需测试这些潜在的分离轴, 而不根据定义去找分离轴, 如此可减少计算量。

假设参与相交测试的第一个 OBB 对象 A 的 3 根轴为 e_1 、 e_2 、 e_3 , 中心为 T_A , 沿轴向的长度一半为 a_1 、 a_2 、 a_3 , 同样第 2 个 OBB 对象 B 的 3 根轴为 f_1 、 f_2 、 f_3 , 中心为 T_B , 沿轴向的长度一半为 b_1 、 b_2 、 b_3 。假设 a 是分离轴, 那么式(10)成立就可以认为 A 与 B 不相交。

$$|a \cdot T_A T_B| > \sum_{i=1}^3 a_i |a \cdot e_i| + \sum_{i=1}^3 b_i |a \cdot f_i|, \quad (10)$$

$$a \in \{e_i, f_i, e_i \times f_i, 1 \leq i \leq 3, 1 \leq j \leq 3\}. \quad (11)$$

由式(11)可知三维空间中任意方向的 2 个 OBB 包围盒之间的潜在分离轴理论上最多可有 15 根。如果 2 个包围盒相互平行, 那么实际潜在分离轴将退化为 3 根非零向量, 即长方体的方向轴向量, 此时如长方体的方向轴和坐标轴平行, 就成为 AABB 包围盒的情况^[10]。

对全部 15 根潜在分离轴进行测试并不可取, 文献[11]提出了只进行 6 根潜在分离轴的测试, 在考虑待检测的 2 个 OBB 包围盒的闵可夫斯基和^[12-14]情况下, 实际只需要测试全部潜在分离轴中的 $\{e_1, f_1, g_{23}, g_{32}, g_{33}\}$ 5 根分离轴, 其中 g_{ij} 为 e_i 和 f_j 的向量积且规定 $e_1 < e_2 < e_3, f_1 < f_2 < f_3$ 。讨论如下:

在三维欧氏空间中,假设 2 个包围盒 A 与 B 外形对称且参考点位于其几何中心,则在不改变 2 个操作数相对方位的情况,一个操作数 A 沿着另一个操作数 B 的外轮廓滑行, A 的参考点经过的轨迹就是 A 和 B 的 Minkowski Sum,根据闵可夫斯基和定义有 $A = -A = \{-a | a \in A\}$ 和 $B = -B$,则下式成立:

$$(A+p) \cap (B+q) \neq \varnothing \Leftrightarrow a+p=b+q (a \in A, b \in B) \Leftrightarrow p=-a+b+q \Leftrightarrow p \in A \oplus B+q (-a \in -A=A).$$

为便于解释用图 1 所示的二维状态下(不失一般性)一对 OBB 包围盒的闵可夫斯基和来阐述笔者选择分离轴组合的主要依据。假设图中包围盒 A 和 B 的参考点在垂直与水平方向距离相等都为 l_1 ,此种情况下二者的分离轴测试,相应地就转化为由形成闵可夫斯基和的 4 对相互平行的线所构成的平面区域与包围盒参考点间的包含关系测试,在垂直方向上包围盒 A 未移动前其参考点位于由 S_1 与 S_2 所围区间之外,当 A 向下移动距离 l_2 后虽然 A 与 B 并未重叠但参考点却落入区间之内;而在水平方向上移动同样距离并未像垂直方向上那样出现参考点分属由 S_3 与 S_4 所围区间内外的状况,此图表明包围盒的不同潜在分离轴的敏感度是不一样的,尺度相对较小的方向较为敏感。

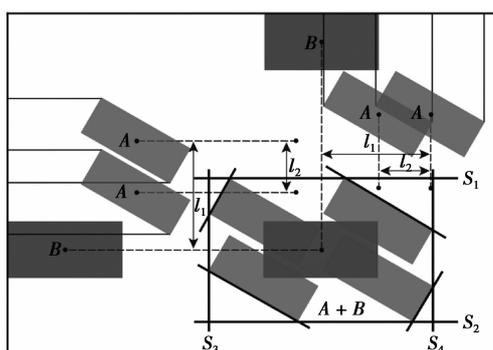


图 1 包围盒二维轴向闵和包含测试示意

在三维状况下包围盒 A 的潜在分离轴 e_1 相对于 e_2 和 e_3 其分离识别能力更强;基于同样道理包围盒 B 的潜在分离轴 f_1 比 f_2 和 f_3 更为敏感。为评估包围盒的投影长度可用 e_i 和 f_j 的向量积 g_{ij} 来衡量, g_{23} 与 e_2 和 f_3 正交,包围盒 A 的投影尺度最大值应在轴 g_{23} 上,其投影长度应介于区间 $[e_1, \sqrt{e_1^2+e_3^2}]$,同样包围盒 B 在 g_{23} 上的投影长度应介于区间 $[f_1, \sqrt{f_1^2+f_3^2}]$ 内如图 2 所示。

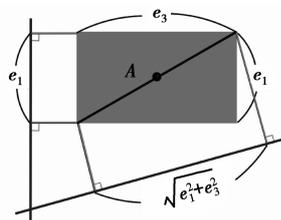


图 2 包围盒投影长度示意

以上对 OBB 包围盒进行分离轴测试讨论说明:由包围盒本身方向轴所决定的分离轴的尺度相对小者更为可取;由 e_i 和 f_j 相对尺度较大者向量积构成的轴 g_{ij} 的选择优先。所以选择 g_{33} 而非 g_{22} 或 g_{11} 。上述讨论是用长方体包围盒的状况下进行的,经初步对比实验测试,由于减少了分离轴测试数目,计算时间可相应减少 15% 到 20% 左右(这和参与测试的模型复杂程度及模型的几何尺度相关)。

对比实验条件为:参与测试的 2 个复杂模型总面数为 32 062, CPU 为 4 核 Intel Core2, 内存 4 GB。实验测试了当二者相距为模型几何尺度量值的 1% 时,优化前耗时 65.36 ms, 优化后为 56.21 ms; 当相距为 5% 时,优化前耗时 12.03 ms, 而优化后为 9.672 ms, 数据取多次测试的平均值。

3.3 基本图元间的碰撞检测

三维几何模型的复杂度与虚拟环境场景规模的巨大,对碰撞检测的实时性提出了挑战。提高碰撞检测的实时性可从两方面着手^[15]:一是减少参与检测的图元数,如前述的划分区域以剔除不必要的检测对象,采用优化的分离轴组合测试,采用层次树等;另一个是减少图元间相交检测的时间,在基于图形的碰撞检测算法中,最终都要进行基本图元(如三角形等)的相交检测。

基本图元间的相交检测有:点/面、面/点及边/边 3 种类型。对于边/边状况,可以检测包含这 2 条边的直线间的关系,如用 $a(t)b(t)$ 表示第 1 条边, $c(t)d(t)$ 表示第 2 条边,那么当式(12)成立时碰撞发生。

$$a(t)c(t) \cdot ((a(t)b(t) \times c(t)d(t))) = 0. \quad (12)$$

对于点/面和面/点的情况,可检测面与点的包含关系,如用 $a(t)$ 表示点,用 $b(t)c(t)d(t)$ 表示一个三角形,则当式(13)成立时碰撞产生。

$$a(t)b(t) \cdot (b(t)c(t) \times b(t)d(t)) = 0. \quad (13)$$

3.4 生成有向包围盒树

取决于包围盒的种类和算法的意图,物体层次包围盒树有自顶而下、自底向上和插入法 3 种构造

方式,但还没有哪种算法被证实比其他 2 种更为优越。本例也采取自上而下方式。首先建立模型的包围盒,将三维实体的最外层包围盒作为二叉包围盒树的根节点;然后结合考虑包围盒的闵可夫斯基和的分离轴组合理论,按照一定的规则采用自顶向下方法,将分割后所得到的子结点体积之和最小的方向作为分离轴方向,确定根节点的分离轴;对根节点进行划分,形成下一级子包围盒结点,计算每一个三角面片所属的三维空间,如果三角面片与分割平面相交,则计算中心位置以确定三角面片所属区间;递归划分每一级节点,直至生成最终的叶子节点,即单一的三角面片。

事实上在连续碰撞检测中,根据碰撞的局部性原理可知,紧跟着前次碰撞的后一次碰撞其发生位置以当前位置的周边概率为最大,这就意味着在算法中对后续碰撞检测的搜索开始点不以二叉树的根节点为起点,而是以当前碰撞发生的结点位置开始,这可以减少算法执行时间加快检测速度。

4 下装系统碰撞检测实例

中国大型高功率激光装置光路系统所用 LRU 为专门定制价格昂贵的易损部件,为确保装校过程的绝对安全,下装系统的全局干涉碰撞检测算法的计算效率就是一个必须处理的问题。为此本例采用如图 3 所示的碰撞检测流程,用前述的算法采用面向对象的 C++ 开发,成功地对下装系统(如图 4 所示)的装校过程进行连续碰撞检测。系统首先利用区域划分方法剔除不必检测对象(检测时非 LRU 所处区域范围内以及按时序不运动的对象)以减少计算开销,然后在考虑包围盒的闵可夫斯基和的基础上优化分离轴测试组合,结合碰撞的局部性原理与基本图元相交测试理论,最后对可能相交的对象进行精确的碰撞检测(基本图元间的相交检测),减少了不必要的检测计算,提高实时连续检测的效率。

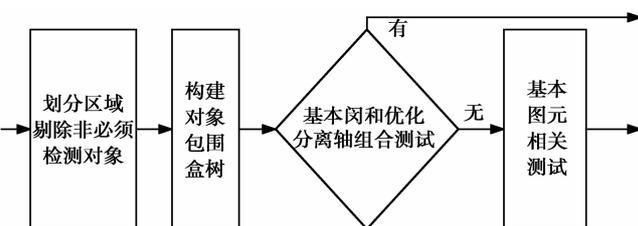


图 3 ICF 装置下装系统碰撞检测流程

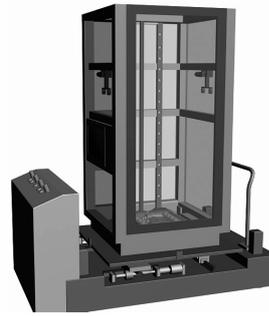


图 4 ICF 装置下装装校系统结构模型

5 结束语

笔者研究了惯性约束聚变装置环境的特殊性,针对 ICF 装置下装系统的装校模块(LRU)特殊要求,对下装系统的碰撞检测进行优化,减少了计算开销,实现了全流程连续碰撞检测,确保了下装模块的安全。下装系统在中国大型高功率激光装置环境中的实际运行结果表明该检测方法安全可靠。本例算法实现步骤较多,如能在现有硬件条件下设计出计算凸或非凸多面体的闵可夫斯基和的更为高效的算法,就能简化算法的程序实现并扩大其应用范围(如机器人运动规划中的障碍空间规避、碰撞检测的穿透深度评估、钣金行业的排样优化等等),这是下一步需研究的课题。

参考文献:

[1] BARKI H, DENIS F, DUPONT F. Contributing vertices-based Minkowski sum computation of convex polyhedra[J]. Computer-Aided Design, 2009, 41(4): 525-538.

[2] LIEN J M. Covering Minkowski sum boundary using points with applications [J]. Computer Aided Geometric Design, 2008, 25(8): 652-666.

[3] HACHENBERGER P, KETTNER LUTZ, MEHLHORN K. Boolean operations on 3D selective Nef complexes: data structure, algorithms, optimized implementation and experiments [J]. Computer Geometry, 2007, 38(1/2): 64-99.

[4] HACHENBERGER P, KETTNER L. Boolean operations on 3D selective Nef complexes: optimized implementation and experiments[C]// Proc. of the 2005 ACM Symposium on Solid and Physical Modeling, June, 2005, Boston, MA. New York: ACM, 2005: 163-174.

[5] VARADHAN G, MANOCHA D, HUB B, et al. Accurate Minkowski sum approximation of polyhedral models[J]. Graphical Models, 2006, 68(4): 343-355.

- 1604-1610.
- [5] DE MAGALHÃES CORREA J P, FERRON G. Wrinkling predictions in the deep-drawing process of anisotropic metal sheets [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 128(1/3): 178-190.
- [6] WANG X. Stress-based wrinkling criteria and experimental verifications in sheet metal forming[D]. Xi'an: Northwestern University, 2000.
- [7] WANG X, CAO J. Wrinkling limit in tube bending[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, *Transaction of the ASME*, 2001, 123: 430-435.
- [8] YANG H, LIN Y. Wrinkling analysis for forming limit of tube bending process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 152(3): 363-369.
- [9] LI H, YANG H, ZHAN M, et al. A new method to accurately obtain wrinkling limit diagram in NC bending process of thin-walled tube with large diameter under different loading paths [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 177(1/3): 192-196.
- [10] PAULESN F, WELO T. A design method for prediction of dimensions of rectangular hollow section formed in stretch bending [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 128(1/3): 48-66.
- [11] 坂木修次, 藤院琢磨, 原岛寿和. 角管の回轉引き曲げ加工における変形と加限度[J]. *塑性と加工*, 1995, 36(414): 719-724.
- SAKAKI S, TOIN T, HARASHIMA T. Deformation and working limit of square tube in draw bending process[J]. *Journal of Japan Society for Technology of Plasticity*, 1995, 36(414): 719-724.
- [12] ZHAO G Y, LIU Y L, YANG H, et al. Three-dimensional finite-elements modeling and simulation of rotary-draw bending process for thin-walled rectangular tube[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 499(1/2): 257-261.
- [13] ZHAO G Y, LIU Y L, YANG H. Numerical simulation on influence of clearance and friction on wrinkling in bending of aluminum alloy rectangular tubes[J]. *Materials Science Forum*, 2007, 546/549: 833-838.
- [14] 郑少华, 姜奉华. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2004.

(编辑 王维朗)

(上接第 25 页)

- [6] FOGEL E, HALPERIN D. Exact and efficient construction of Minkowski sums of convex polyhedra with applications[J]. *Computer-Aided Design*, 2007, 39(11):929-940.
- [7] HACHENBERGER P. Exact Minkowski sums of polyhedra and exact and efficient decomposition of polyhedra in convex pieces [J]. *Algorithmica*, 2009, 55(2):329-345.
- [8] LARSSON T, AKENINE-M ÖLLER T, Y LARSSON T, et al. Collisions detection for continuously deforming bodies[C/OL]// In Proceedings of Eurographics'2001, Manchester, United Kingdom, September 3-7, 2001: 325-333. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.23.5176>.
- [9] TRENKEL S, WELLER R, ZACHMANN G. A benchmarking suite for static collision detection algorithms [C/OL] // International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, Plzen, Czech Republic, 2007. http://wscg.zcu.cz/wscg2007/Papers_2007/full/F71-full.pdf.
- [10] HACHENBERGER P. Exact Minkowski sums of polyhedra and exact and efficient decomposition of polyhedra in convex pieces [J]. *Algorithmica*, 2009, 55(2):329-345.
- [11] JIMÉNEZ P, THOMAS F, TORRAS C. 3D collision detection: a survey [J]. *Computers and Graphics*, 2001, 25(2): 269-285.
- [12] ZHANG X, KIM Y. Interactive collision detection for deform-able models using streaming AABBs [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2007, 13(2):318-329.
- [13] FRIEDMANN M, PETERSEN K, VON STRYK O. Adequate motion simulation and collision detection for soccer playing humanoid robots [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2009, 57(8):786-795.
- [14] CHANG J W, WANG W P, KIM M S. Efficient collision detection using a dual OBB-sphere bounding volume hierarchy[J]. *Computer-Aided Design*, 2010, 42 (1): 50-57.
- [15] TROPP O, TAL A, SHIMSHONI I. A fast triangle to triangle intersection test for collision detection [J]. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 2006, 17(5): 527-535.

(编辑 张 苹)