

排爆机器人训练仿真系统中的碰撞检测技术

丁伟利^{1,2}, 郝颖明¹, 朱枫¹, 秦丽娟^{1,2}, 刘晓民^{1,2}

(1.中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016; 2.中国科学院研究生院, 北京 100080)



摘要: 精确的碰撞检测对提高虚拟现实系统的沉浸性、真实感至关重要。但是 Vega 只对碰撞检测提供了有限的支持, 为提高碰撞检测的实时性和精确度, 提出了分块设置掩码、动态加载相交矢量、在运动物体易发生碰撞的部位放置相交矢量以及物体高速运动时引进距离因子等方法。有效的解决了排爆机器人训练仿真系统中遇到的各种碰撞检测问题。

关键词: 虚拟现实; 碰撞检测; 相交矢量; 排爆机器人

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-731X (2006) 03-0675-05

Collision Detection for Simulation Training System of Explosive Ordnance Disposal

DING Wei-li^{1,2}, HAO Ying-ming¹, ZHU Feng¹, QIN Li-juan^{1,2}, LIU Xiao-min^{1,2}

(1.Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2.Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Efficient and exact collision detection is very important to improve reality and enhance immersion for virtual reality system, but limited collision detection methods are provided by Vega. In order to improve real-time and precision of collision detection, some new methods were developed such as *setting mask partly*, *loading isectors dynamically*, *setting isectors in some special parts where collision occurs frequently and introducing distance gene*. The collision detection problems in Explosive Ordnance Disposal simulation training system were solved using these methods, and results demonstrate methods' effectiveness.

Key words: virtual reality; collision detection; isectors; Explosive Ordnance Disposal

引言

排爆机器人 (Explosive Ordnance Disposal, 简称 EOD) 作为反恐机器人, 在英、美、法、德等多个国家都有了较为成熟的产品, 并在国际反恐斗争中得到了广泛的应用^[1]。我国虽起步较晚, 但目前也基本掌握了相关技术并生产出成品产品装备到一线部门, 并在反恐斗争中开始发挥作用^[2]。

排爆机器人一般为遥控式移动机器人, 由机器人本体和遥控操作箱组成。工作时, 只有机器人本体进入危险环境, 而操作人员则在安全地带通过遥控操作箱来遥控机器人。这种作业方式要求操作者具有熟练的操作技能和丰富的作业经验, 因此其操作员必须经过大量的训练。为训练操作员的操作技能而频繁使用, 特别是在各种复杂环境中训练使用机器人将直接影响装备的寿命和安全。

排爆机器人模拟训练系统 (图 1) 是为满足排爆机器人操作员训练而开发的一种模拟训练设备, 该设备以实际排爆机器人为原型, 主要模拟实际机器人在各种复杂的环境下的作业过程, 包括平地行走、坡路行走、上下楼梯、避障、排

爆等。模拟过程中, 需要实时、准确地进行碰撞检测, 以避免出现机器人穿墙而过或陷入物体的现象, 影响仿真的真实性。

近年来, 虚拟现实技术广泛应用于军事、教育、工程等领域^[3-4], 碰撞检测作为虚拟现实的关键技术之一, 也得到了越来越深入的研究, 特别是刚体间的碰撞检测技术, 已经比

较成熟, 并应用到各种仿真系统中, 解决了很多碰撞检测问题^[6]。目前关于刚体的碰撞检测技术可分为空间分解法和层次包围盒两大类方法, 空间分解法主要包括八叉树法、BSP 树法; 层次包围盒主要包括沿坐标的包围盒 AABB、包围球、方向包围盒和固定方向凸包^[5]。

排爆机器人教学模拟训练系统是利用 Vega 开发的软件, Vega 提供了基本的碰撞检测功能, 可以实现简单模型间的碰撞检测, 但对于大规模的场景以及复杂的运动体, Vega 所提供的碰撞检测速度、精确度上都大大降低, 影响



图 1 排爆机器人模拟训练系统

收稿日期: 2005-01-12 **修回日期:** 2005-07-15

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2002AA420070)

作者简介: 丁伟利 (1979-), 女, 硕士生, 研究方向为计算机视觉, 虚拟现实技术; 郝颖明 (1966-), 副研究员, 硕导, 研究方向为计算机视觉, 虚拟现实技术; 朱枫 (1962-), 研究员, 博导, 研究方向为计算机视觉, 虚拟现实技术。

仿真系统的真实感。另外, Vega 封装了碰撞检测的底层算法, 不提供场景数据结构信息, 因此很难利用现有的高效碰撞检测算法, 从底层对算法进行改进。要提高碰撞检测的实时性、精确度只能以 Vega 提供的方法为基础。

本文针对排爆机器人模拟训练系统场景大、静态物体多、机器人关节运动复杂等特点, 提出了灵活放置线段、引进可伸缩碰撞检测因子等方法, 实现了虚拟机器人在行走、避障、爬坡、上下楼梯等过程中遇到的碰撞检测以及虚拟机器人在排爆过程中精确的抓取、搬运、排除炸弹等关键问题。

1 Vega 中碰撞检测算法简介

Vega 作为一种高级的仿真驱动软件, 提供了基本的碰撞检测方法—相交矢量法, 该方法通过检测线段与组成场景的多边形是否相交来判断碰撞^[7]。Vega 共提供 8 种相交矢量法, 即 VOLUME、HAT、Z、ZPR、XYZPR、LOS、TRIPOD 和 BUMP 方法。VOLUME 方法为用户自定义的方法; HAT、Z、XYZPR 方法都为垂直线段, 是与地形的碰撞检测, 不同之处在于 HAT 方法用于计算地面以上的高度, Z 方法用于检测地面高低的改变, XYZPR 方法用于计算地面以上的高度以及交叉点的俯仰和横滚, 当把它们加到运动模型中, HAT、Z 方法能使观察者的视点随地形的高低变化, XYZPR 方法使观察者始终与地面方向保持一致; LOS 方法为水平线段, 用于检测前进或后退时与前方障碍物的碰撞情况^[8]。

如图 2 所示 TRIPOD 相交矢量^[7], 图中, O 为相交矢量中心, M、N、P 为线段与代表地面的多边形的交点, 即碰撞点。该相交矢量由平行于 Z 轴的三条线段 MA、PB、NC 组成, 用于检测物体与地面发生的碰撞。在应用中, 线段 OM、OP、ON 的长度和三条线段 MA、PB、NC 的长度可以根据实际情况设置从而可以将 TRIPOD 相交矢量关联到不同的运动物体上, 使运动物体始终保持在地面上行走。

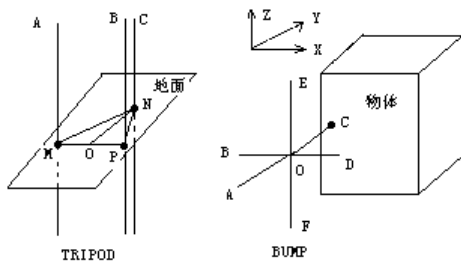


图 2 TRIPOD 相交矢量、BUMP 相交矢量

图 2 中所示 BUMP 相交矢量^[7], O 点为相交矢量中心, C 为相交矢量与物体的碰撞点。该相交矢量由分别平行于 X、Y、Z 轴的六条线段 OA、OB、OC、OD、OE、OF 组成, 用于检测这六个方向上的线段是否与场景中的物体有碰撞。应用中, 六条线段的长度可以根据所检测的各个方向的不同需要来设置, 如果有碰撞发生, 能得到碰撞点的世界坐标和相交矢量中心到碰撞点的距离, 可以利用这些信息进行碰撞检测。

2 碰撞检测方法的选择及扩展

2.1 方法的选择

排爆机器人仿真训练系统具有以下特点:

- (1) 场景大 (约 3000*3000m²);
- (2) 静态模型多 (近百个);
- (3) 虚拟机器人的关节及其运动多 (9 个关节 22 种运动);
- (4) 场景中的地面凹凸不平 (平地、坡路、楼梯等);
- (5) 场景由 5 个训练模块组成: 平地作业、坡路作业、排爆作业、室内综合、室外综合。各模块之间互相独立, 机器人进入哪一个模块通过菜单切换。

根据特点 (4), 选择 TRIPOD 相交矢量法, 将其关联到虚拟机器人上, 可以保证虚拟机器人始终在地面上行走, 且保证观察者始终与地面保持水平; 根据特点 (2)、(3), 选择 BUMP 相交矢量法, 将其关联到容易发生碰撞的物体或部位上进行碰撞检测, 可以检测到六个方向的碰撞。

2.2 碰撞检测的基本过程及方法扩展

首先假定:

- (1) 机器人在场景中做匀速直线运动
- (2) 机器人各关节的运动有一定的限位 (例如, 小臂只可以在 0-180 度范围内运动)。

碰撞检测的基本过程为: 第一步, 设置静态物体的掩码 (相交矢量的各线段将与设置掩码的物体求交)。第二步, 计算当前帧中所要放置相交矢量的机器人关节的世界坐标, 并将其值赋予相交矢量。第三步, 得到当前帧相交矢量各线段与场景中物体的碰撞结果, 包括碰撞点坐标以及相交矢量中心到碰撞点的距离 d 。第四步, 如果 d 大于某一距离尺度时有碰撞发生, 下一帧机器人的位姿不发生变化, 否则机器人继续运动。然后再以下一帧为基础进行判断, 重复二到四步。

选择 TRIPOD 和 BUMP 相交矢量法, 根据上面的步骤可以初步检测仿真系统中的碰撞, 保证虚拟机器人不陷入地里, 遇到墙壁等障碍停止, 但是由于不能随意放置 BUMP 相交矢量的位置, 因此这种检测十分粗略, 机器人大小臂、机械手、前摆等部位的碰撞都无法检测到。由于场景过大, 加入相交矢量后, 庞大的计算量影响了系统的执行速度, 帧与帧之间的画面不再连贯。因此要实现实时、精确的碰撞检测, 需要提出有效的解决办法。

2.2.1 分块设置掩码

在 Vega 中, 掩码的设置直接决定着每一帧画面组成相交矢量的各条线段要与多少个多边形进行计算, 即直接决定着计算量的大小。排爆机器人模拟训练系统中, 场景主要由平地作业模块 (flat)、坡路作业模块 (slope)、排爆作业模块 (bomb)、室外综合模块 (outdoor)、室内综合模块 (indoor) 几个部分组成, 机器人分别在几个模块中作业, 即机器人不能同时出现在两个不同的模块中。如果统一设置掩码, 计算量将

会很大, 因此, 我们采用分别设置掩码的方法来降低系统的运算量, 从而提高系统的运算速度。

设置: flat—terrain1; slope—terrain2; bomb—terrain3;
outdoor—terrain4; indoor—terrain5。

这样, 机器人位于哪一个模块, 相交矢量就只与组成这一模块的多边形进行碰撞检测。粗略比较, 与整体设置掩码比, 该方法的计算量减小到原来的 20% 以上。

2.2.2 动态加载相交矢量 (BUMP)

在排爆机器人模拟训练系统中, 运动的物体只有机器人, 且机器人关节的运动主要发生在大、小臂, 机械手, 前、后摆, 碰撞也主要在这些部位发生。如果能够实时地在这些敏感部位放置相交矢量, 随着机器人的运动, 就能实时的检测出机器人是否与周围物体发生碰撞。但 Vega 仅提供了把相交矢量关联到运动物体中心的方法, 对于容易发生碰撞的部位, 如机械手、前、后摆则很难将相交矢量放置在上面。

为了解决这个问题, 可以充分利用能够得到的坐标信息, 采用间接计算的方式, 推导出要放置相交矢量的部位的坐标。式 (1) 给出了推导过程。

$$\begin{cases} x = x_0 - D \cos(p_0 / 57.296) \sin(h_0 / 57.296) \\ y = y_0 - D \cos(p_0 / 57.296) \cos(h_0 / 57.296) \\ z = z_0 + D \sin(p_0 / 57.296) \end{cases} \quad (1)$$

式中, (x, y, z, h, p, r) 是希望得到的机器人关节坐标, $(x_0, y_0, z_0, h_0, p_0, r_0)$ 是通过 Vega 中的函数可以得到的机器人关节中心的坐标, D 是两点之间的距离 (根据虚拟机器人建模的尺寸可求), 这样就可以在每一帧把相交矢量通过下面的程序^[8]放到我们想要放置的位置:

```
vgPosition *pos=vgNewPos();
vgPosition *pos1= vgNewPos();
/*得到部件的中心坐标*/
vgGetWCSPos(part,pos);
/*将中心坐标赋予 x,y,z,h,p,r*/
vgGetPosVec(pos, &x, &y, &z, &h, &p, &r);
/*得到需要放置相交矢量的点的位置, 将它赋予 pos1*/
vgPosVec(pos1,x-d*cos(p/57.296)*sin(h/57.296),y+d*cos(p/57.296)*
os(h/57.296),z+d*sin(p/57.296),h,p,r);
/*放置相交矢量*/
vgPos(isector, pos1);
/*更新相交矢量, 得到计算结果*/
vgUpdate(isector);
/*存储计算结果*/
status=vgGetIsectResult(isector,VGIS_GETBUMP, result);
```

模拟训练系统中相交矢量的放置如图 3 所示。图中, BUMP 相交矢量被放置在 7 个 (四个小轮上各 1 个、机械手上 3 个) 最易发生碰撞的位置, 如果有碰撞发生, 就会很快地

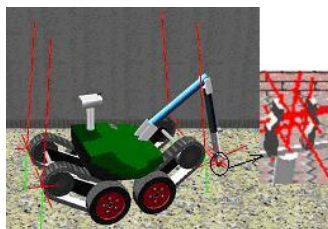


图 3 相交矢量放置

被检测到。

另外, 模拟训练系统控制面板上每一个按钮都对应着机器人不同关节的运动。由于不同的运动会引起不同部位的碰撞, 因此控制相关部位相交矢量的加载时间, 可以减少系统的计算量。例如, 前摆放下时只会使前摆与地面发生碰撞, 此时只要使前摆上的相交矢量起作用即可。同理, 其他部位相交矢量的加载时间也同样处理。

2.2.3 距离因子

机器人在场景中运动时, 如果速度不是很高, 可以用固定阈值来判断相交矢量中的线段是否与物体碰撞。但是当速度提高时, 就会出现陷入、甚至越过物体的情况。针对这一问题, 通过设置可伸缩的距离因子作为判断尺度, 得到了令人满意的结果。

设从当前帧运行到下一帧机器人所走过的距离为 $v*dt$ (距离因子), 其中 v 是机器人的速度, D_0 为正常情况下的距离因子, dt 为每一帧之间的时间间隔。由于前提假设机器人做匀速运动, 所以 v 和 dt 均为已知。在阈值为 D_0 时, 不断提高机器人的速度, 设刚出现陷入时速度为 V_0 , 可知 V_0 为速度临界点, 则有下式。

$$D = \begin{cases} D_0 & (v \leq V_0) \\ D_0 + vdt & (v > V_0) \end{cases} \quad (2)$$

因此, 当速度超过限定值时, 距离尺度也改变, 这样就能及时的检测到碰撞。

以上的几种方法中, 分块设置掩码、动态加载相交矢量大大降低了系统的计算量, 使得仿真画面流畅; 在容易发生碰撞的部位加载相交矢量以及距离因子的引入极大的提高了碰撞检测的精确度。

3 碰撞响应

碰撞响应是碰撞检测的另一个重要问题, 其效果的好坏直接影响着仿真系统的真实性。

在排爆机器人教学模拟训练系统中, 碰撞发生后, 对机器人及其各运动关节来说, 响应主要为相应的部位停止运动; 在排爆这一过程中, 则表现为爆炸物被抓起、投入防爆罐或爆炸。

3.1 机器人及其各运动关节发生碰撞后的响应问题

在机器人运动过程中, 由于假设 (1), 机器人从当前帧运动到下一帧前进或后退的距离为已知, 设为常量 d , 因此机器人的运动方程可表示为:

$$\begin{cases} x = x' - d \cos(p' / 57.296) \sin(h' / 57.296) \\ y = x' + d \cos(p' / 57.296) \cos(h' / 57.296) \\ z = z' + z' \sin(p' / 57.296) \\ h = h' + dh \\ p = p' + dp \\ r = r' \end{cases} \quad (3)$$

该系统中机器人关节 (机械手除外) 的运动只有俯仰角

变化, 因此关节运动方程可表示为:

$$p_1 = p_1' + dp_1 \quad (4)$$

在公式 (3) 中, x 、 y 、 z 、 h 、 p 和 x' 、 y' 、 z' 、 h' 、 p' 分别为机器人下一帧和当前帧的位姿(机器人运动不考虑 r 的变化), dh 、 dp 为机器人从当前帧运动到下一帧所旋转的角度和俯仰角的变化值。公式 (4) 中 p_1 、 p_1' 为机器人某一关节下一帧和当前帧的俯仰角, dp_1 为某一关节俯仰角变化值。当机器人某一关节上的相交矢量检测到碰撞并且距离返回值小于其对应的距离阈值时, 碰撞发生, 此时置相应的 d 、 dh 、 dp 或 dp_1 为 0, 即可控制机器人或相应关节停止运动。例如: 在爬楼梯过程中, 当机器人前摆碰到楼梯时, 机器人将停止运动, 警报发出, 此时, 操作员只有控制前摆抬起, 机器人才能继续爬另一阶楼梯(如图 4 爬楼梯过程)。



图 4 排爆机器人碰撞检测实验结果

3.2 抓炸弹的碰撞响应问题

机械手抓炸弹的碰撞检测过程最为复杂。当操作员发现炸弹后, 首先要控制机械手张开, 然后调好位置控制机械手闭合, 抓起炸弹。稍有不慎, 则有可能碰倒炸弹, 引发爆炸。当抓住炸弹后, 要把炸弹运送到防爆罐所在的位置, 并将其投入其中。整个过程机械手的运动方程为:

$$x = x' + dx (-0.8 \leq x \leq 0.8) \quad (5)$$

其中 x 、 x' 表示机械手左右手当前帧和下一帧的位置, dx 小于 0 表示左手动, 大于 0 表示右手动。机械手张开的同时, 机械手后部需要回缩, 以便抓到炸弹, 其运动方程可表示为:

$$y = y' + 2dx/3 \quad (6)$$

此外, 机械手抓炸弹的过程中, 为抓到不同位置的炸弹, 还要考虑到机械手旋转, 其运动方程表示为:

$$r = r' + dr \quad (7)$$

公式 (5)、(6)、(7) 表示了抓炸弹过程中机械手可能出现的所有运动, 这些运动以及机器人其他部位运动引发的碰撞响应可以通过下面方法仿真。

如图 3 所示, 为完成高精度的碰撞检测, 将三个相交矢量 (9 条线段) 设置在最易发生碰撞的部位。设左手中心相交矢量上沿左手向前、向后和向右的线段分别为 l_1 、 l_2 、 l_3 , 右手前端相交矢量上沿右手向前、向后和向左的线段分别为 l_4 、 l_5 、 l_6 , 横梁中心相交矢量上沿横梁向左、向右、向前的线段分别为 l_7 、 l_8 、 l_9 。 $l_x = 1$ ($x=1\sim 9$) 表示有碰撞发生, 否则无碰撞发生。当 $l_1\sim l_9$ 中任意一个为真时, 可得到碰撞点坐标 (x,y,z) 和炸弹中心当前坐标 (x_0, y_0, z_0) , 由于炸弹为圆柱体 (a 为圆柱的地面半径, h 为圆柱高的一半), 因此如果满足方程:

$$(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 = a^2; \quad (z_0 - h \leq z \leq z_0 + h) \quad (8)$$

则说明机械手已与炸弹碰撞, 此时可进一步判断炸弹与机械手的具体哪一部分发生碰撞, 并作出相应的碰撞响应:

$l_1 \mid l_2 = 1$, 炸弹与机械左手碰撞, 此时置左手的运动量为 0, 使左手停止运动。

$l_4 \mid l_5 = 1$, 炸弹与机械右手碰撞, 此时置右手的运动量为 0, 使右手停止运动。

$l_7 \mid l_8 = 1$, 炸弹与横梁碰撞, 此时置引起这一部分运动的运动量为 0, 机械手停止运动。

上述过程, 如果发生碰撞后, 操作员继续控制机器人或相应部位运动, 炸弹将被推倒, 发生爆炸。

$l_1 \& l_2 \& l_3 \& l_5 \& l_9 = 1$, 炸弹位于机械手中间部分, 可以将其抓起, 此时计算机械手中心坐标, 将其值实时赋予炸弹位置变量, 可以实现机械手抓炸弹过程的仿真。如果机械手在抓住炸弹后并已将其运送到防爆罐上方, 此时机械手松开, 炸弹落入防爆罐, 与铁丝网碰撞后停止运动。

4 仿真结果

上述碰撞检测方法已经在排爆机器人教学模拟训练系统中应用, 很好地实现了虚拟机器人在仿真环境中的爬斜坡、爬楼梯、避障、机械手准确的抓爆炸物、搬运爆炸物以及排除爆炸物操作的实时仿真。利用此系统对不同的操作员进行反复模拟训练, 取得了满意的效果。图 4 给出了部分仿真中的截图, 从这些实验结果可以看出, 本文提出的方法可以准确检测机器人操作过程中的碰撞。此外, 通过反复操作,

还证明该方法具有实时性强、可靠性高的特点。碰撞检测及其响应的加入, 提高了排爆机器人模拟训练系统的真实感、沉浸感, 增强了仿真训练系统的效果。

5 结论

本文在 Vega 提供的碰撞检测方法的基础上, 针对排爆机器人教学模拟仿真系统的特点, 提出了分块设置掩码、动态加载相交矢量、在运动物体的敏感部位放置相交矢量以及物体高速运动时引进距离因子的方法, 并分析了可能的各种碰撞响应, 解决了排爆机器人在作业过程中遇到的碰撞检测问题。应用结果表明该方法有效地控制了系统的计算量, 提高了运算速度, 具有实时性好, 编程简单的特点。该方法也可用于其他可分模块的大场景系统以及关节运动多的动态物体仿真系统中。

(上接第 665 页)

对粒子数量的确定原则是既满足实时性要求, 又满足视觉效果, 一般根据仿真确定。

粒子数为 1、5、16、32 时的尾烟如图 6、7、8、9 所示。



图 5 粒子数为 1 时

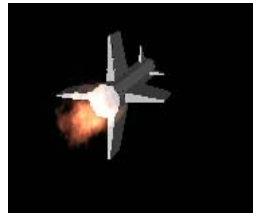


图 6 粒子数为 5 时



图 7 粒子数为 16 时

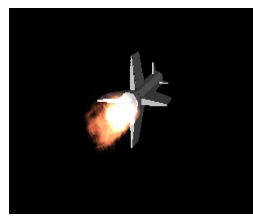


图 8 粒子数为 32 时

4 结论

原始的粒子系统方法是让粒子充满整个粒子的诞生区域, 导致粒子数量庞大, 很难应用于实时性要求较高的虚拟现实系统场景的模拟, 像模拟导弹尾焰这样的模糊景物至少需要绘制 5000 个微小粒子, 使用普通微机产生一幅画面需要 2 个小时, 不能满足实时性要求。本算法将粒子系统原理和纹理映射技术相结合, 克服了原始粒子系统方法需要绘制大量微小粒子的不足, 在近似显示、且要求不必太精确的场合下, 只需定义 32 个四边形就可以得到较好的视觉效果, 大大提高了导弹尾焰的绘制速度, 在普通。微机上可以实时

参考文献:

- [1] 鲁玉英. 爆炸物处理机器人[J]. 机器人情报, 1991, (3): 22-23.
- [2] 李科杰. 危险作业机器人发展战略研究[J]. 机器人技术与应用, 2003, (5): 14-22.
- [3] 邹湘军, 孙健, 等. 虚拟现实技术的演变发展与展望[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(9): 1905-1909. (ZOU Xiang-jun, SUN Jian. The Development and Prospects of Virtual Reality [J]. Journal of system simulation, 2004, 16(9): 1905-1909.)
- [4] Astheimer P, Rosenblum L. A business view of virtual reality[J]. IEEE Computer Graphics and Applications(S0272-1716), 1999, (11-12): 28-29
- [5] 魏迎梅, 王涌, 吴泉源, 石教英. 碰撞检测中的层次包围盒方法[J]. 计算机应用, 2004,(8):241-243.
- [6] Van Den Bergen G.Efficient collision detection of complex deformable models using AABB trees[J]. Journal of Graphics Tools (S1086-7651), 1997, (4): 1-13.
- [7] MutiGen-Paradigm Inc. Vega Programmer's Guide [M]. Version3.7.1, USA: MultiGen-Paradigm Inc.,2001.
- [8] 邓琛, 张琴舜. 虚拟现实系统中碰撞检测技术初探[J]. 微型电脑应用, 2003, (8): 55-56.

生成导弹飞行时的尾焰,图形生成的帧频率达到 25 帧/秒。本算法仅仅以导弹飞行时的尾焰为例进行了模拟, 只要稍加改进(选取不同的纹理图像和粒子属性), 可方便地应用于其它类似模糊景物的模拟, 如飞机坠毁时尾部的浓烟, 轮船在大海上航行时尾部溅起的浪花和海面上划出的痕迹等。

本文经过实际模拟表明, 在原始的粒子系统方法中粒子的颜色、亮度、速度、数量、生存期和粒子大小, 分别决定了模拟对象的色彩、模糊度、变化快慢程度、密度和精细程度。如何确定恰当的粒子的初始和动态属性是粒子系统方法的一个难点, 需要作大量的“试凑”才能得到较好的视觉效果。如对颜色的确定, 尤其是各基色以及黑白色之间过渡带颜色的确定, 必须对模拟对象进行仔细观察, 甚至要从照片和录像中采样才能得到较准确的颜色数据。本文采用的纹理映射粒子系统方法把颜色变黑即令粒子消失作为控制生存期的条件之一, 同时采用融合技术, 较好地解决了粒子属性难以确定的问题。

参考文献:

- [1] Michael E Goss. Motion Simulation-A Real Time Particle System for Display of Ship Wares[J]. IEEE Computer Graphics & Applications(S0272-1716), 1990, 1: 30-35.
- [2] Befnhard Eberhardt, Andreas Weber, Wolfgang strasser. A fast, flexible, particle-system model for cloth draping[J]. IEEE Computer Graphics & Applications(S0272-1716), 1996, 1:52-59.
- [3] Perry C H, Picard R W. Synthesizing flames and their spread[C]// Siggraph'94. Technical Sketches Notes, July 1994.
- [4] 杨冰, 鲁敏. 基于景物特征的粒子系统建模技术[J]. 计算机应用研究, 2000, (5): 20-22.
- [5] 詹荣开, 罗世彬, 等. 用粒子系统理论模拟虚拟场景中的火焰和爆炸过程[J]. 计算机工程与应用, 2001, (5): 91-92.
- [6] 王润杰, 田景全, 等. 基于粒子系统的实时雨雪模拟[J]. 系统仿真学报, 2003, 15 (4): 495-496.