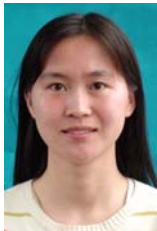


# 排爆机器人教学模拟训练系统的研究与实现

秦丽娟<sup>1,2</sup>, 郝颖明<sup>1</sup>, 朱 枫<sup>1</sup>, 丁伟利<sup>1,2</sup>, 刘晓民<sup>1,2</sup>

(1.中国科学院沈阳自动化研究所第四研究室, 沈阳 110016; 2.中国科学院研究生院, 北京 100080)



**摘 要:** 基于软件平台 Creator 和 Vega 设计开发了排爆机器人教学模拟训练系统, 对系统结构进行了分析, 介绍了系统实现的软硬件方案。阐述了几何建模中基于多边形的组合建模、数据层次结构及优化数据库、LOD 模型应用、纹理问题、重叠问题等关键技术问题, 并且详细介绍了视景驱动软件 Vega 中实现碰撞检测、运动控制等关键技术问题的解决方案。最后实现了整个系统的设计开发, 实验表明该系统具有良好的交互性和实时性。

**关键词:** Creator; Vega; 排爆机器人; 模拟训练

**中图分类号:** TP391

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-731X (2006) 01-0067-04

## Research and Realization of Simulation Training System for Bomb-disposing Robot

QIN Li-juan<sup>1,2</sup>, HAO Ying-ming<sup>1</sup>, ZHU Feng<sup>1</sup>, DING Wei-li<sup>1,2</sup>, LIU Xiao-min<sup>1,2</sup>

(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:** Based on MultiGen Creator and Vega, the simulation training system of bomb-disposing robot was designed and developed. Firstly, the whole architecture of the system was analyzed, and then the software and hardware strategies of realizing the system were introduced. At the same time, some key technologies were discussed, such as combined modeling based on polygon, database hierarchy view and database optimization, the application of LOD model, texture problem and overlapping problem. In addition, the solutions for colliding testing, locomotion control were also introduced in Vega. At last, the design and development of the whole system were realized and the experiment shows that the system performs distinctively in interactivity and real-time characteristic.

**Key words:** Creator; Vega; bomb-disposing robot; simulation training

## 引 言

排爆机器人是一种用于危险环境下排险作业, 拆除爆炸物、危险品的机器人, 目前已广泛应用于、拆弹、爆破等多种场合<sup>[1,2]</sup>。由于排爆机器人操作的专业性和复杂性较强, 操作人员需要具备一定的实践操作经验才能有效完成作业任务。但鉴于机器人本身的复杂性, 属于易损设备不宜依靠机器人实体培训操作人员。因此开发一套专业性强、简单易用的模拟训练平台显得尤为必要。排爆机器人教学模拟训练系统是为了使操作者快速掌握排爆机器人的操作技巧而开发的一套模拟训练系统。该模拟训练系统以 Creator 进行几何建模, 以 Vega 实现视景驱动并使用 VC++ 集成开发实现。在开发过程中, 引入了模型变换的 LOD 机制, 有效解决了远近视景切换时纹理闪烁问题。实验证明这套教学模拟训练系统的开发可以缩短培训时间, 节省培训费用, 并可人为模拟各种训练环境以提高训练质量, 为操作演练提供了有效、经济的手段和途径。

## 1 系统结构与功能

排爆机器人教学模拟训练系统由操作面板、数据处理计算机、液晶显示器、I/O 接口卡、电源、设备箱及相应的软件组成。其中, 操作面板与实际排爆作业机器人操作面板相似, 用于操作命令的输入, 实际机器人操作面板上的所有操控部件都可以在该面板上找到对应的控件。数据处理计算机用于模型生成和数据处理。液晶显示器用于模拟实际机器人遥控操作箱内的图像监视器, 在显示场景图像的同时, 也用于软件界面的显示。I/O 接口卡包括 A/D 转换卡和并行数字 IO 卡, 分别用于模拟信号和数字信号的输入和输出, 电源则为操作面板上的操控部件供电。所有这些硬件设备都集成在一个设备箱内, 而系统软件则运行在数据处理计算机中。系统的硬件框图如图 1 所示, 实物图如图 2 所示。

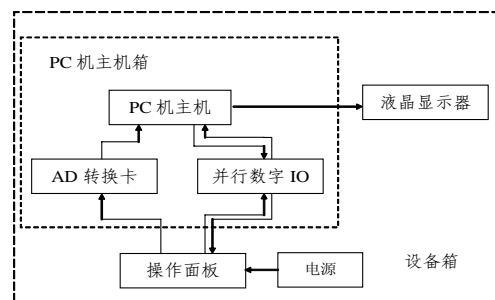


图 1 硬件结构框图

收稿日期: 2004-11-10 修回日期: 2005-03-21

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2002AA420070)

作者简介: 秦丽娟 (1978-), 女, 博士生, 研究方向为计算机视觉, 虚拟现实技术; 郝颖明 (1966-), 副研究员, 硕士导师, 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。

作为一种教学与训练模拟设备,排爆机器人教学模拟训练系统的主要功能包括三个:功能演示、模拟训练和技能评价。功能演示包括在线演示和交互演示两种方式,在线演示以在线帮助的形式演示实际排爆机器人和该教学模拟训练系统的功能和使用方法;交互演示则通过人机交互



图 2 系统实物图

方式选择要演示的传感器,用文字方式显示出该传感器的功能和操作方法。模拟训练则在一定的仿真训练场景中,根据操作台面板出的各种控制命令,模拟排爆机器人的各种作业过程,作为该系统的主要功能,根据操作的难易程度设计了平地行走、坡路行走、排爆作业、室内综合和室外综合五个训练模块。技能考评即在各个训练模块中,根据不同的考评规则,给操作者的操作技能打分。除三个主要功能外,为提高模拟训练效果,该系统还具有视点切换和违规操作的提示功能。

上述功能中,在线演示可以通过网页制作技术将各种功能直观地组合起来,交互演示可以通过 VC 的控件技术来实现。而模拟训练的实现则比较复杂,首先要建立场景的几何模型和物理模型,即用计算机技术将真实世界的对象物体在相应的 3D 虚拟世界中重构,并根据系统需求保存部分物理属性。其次通过 IO 接口卡采集操作面板传来的控制命令,识别并处理各种命令。第三,根据摄像机的位置和姿态生成并显示该条件下摄像机所能看到的场景图像。综上所述,该教学模拟训练系统的主要功能模块包括:交互演示模块,在线演示模块,环境建模模块,场景驱动模块,运动学建模模块,数据采集模块,技能考评模块。系统各功能模块之间的相互关系如图 3 所示。在这些功能模块中,环境建模和场景驱动模块为本系统的核心模块。

## 2 环境建模关键技术

排爆机器人教学模拟训练系统中的环境模型主要包括:排爆机器人本体模型,平地行走训练环境模型,坡路行走训练环境模型,排爆作业训练环境模型,室内综合训练环境模型,室外综合训练环境模型。在这些模型建立过程中,涉及到以下几项关键技术。

### 2.1 基于多边形组合建模方法的系统建模

Creator<sup>[3]</sup>中是以多边形作为建模的基本单元,并没有提供更多其他复杂的建模工具。对于机器人模型和室外环境模

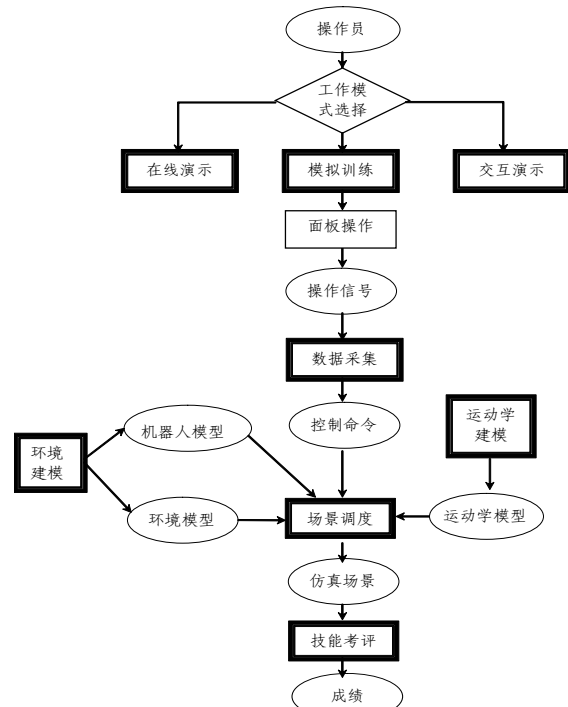


图 3 功能模块关系

型这样结构比较复杂的模型来讲,用 Creator 提供的建模工具直接建模遇到了困难,为此,我们采用了一种以多边形为基础的“组合”建模的方法,实现了整个系统的建模。所谓“组合”建模就是以 Creator 提供的多边形,圆形进行控制操作,建立柱体、锥体、球体等基本三维模型,这些基本三维模型的高度在实际操作中可以通过设置参数来控制,通过对柱体,锥体,球体等基本三维模型的镜像、投影、变形、复制就能建立更复杂的对象模型<sup>[4]</sup>。同时,利用 Creator 提供的修改模块工具修改、缩小、放大模型。最后采用组合原则把各部分连接起来,生成最后的模型。图 4 给出了基于多边形组合建模方法建造的排爆机器人三维几何模型。



图 4 排爆机器人几何模型

### 2.2 建设合理的数据层次结构及数据库优化

场景中对象模型的组织结构(在 Creator 中称为场景数据库)对视图系统的运行质量有极大影响,是用户创建满足自身需要模型时必须重点考虑的问题。Creator 中使用统一图形数据描述格式 OpenFlight 描述模型。它是一种分层结构的景观描述数据库,若干图元构成一个对象,若干对象组成一个组(Group),若干组合成一个更大的组,结构的最上

层是一个关节点 (Head)。结合整个模拟训练系统的需要, 为了提高视景系统的运行效率, 在建立模型的组织结构时, 我们根据虚拟场景中每个实体的空间几何位置以及模型间的结构关系来确定虚拟场景中所有实体模型的树状层次结构。例如根据排爆机器人自身的构造, 可以把机器人分为车身, 云台, 大臂, 小臂, 前腿, 后腿等几部分。把整个机器人设置为 Header Level, 其他各部分设置为 Object Level, Object Level 以下由多个 Face 组成。

实际应用中, 数据库结构的优化直接影响到系统的实时性。对数据库优化, 我们采用以下两种方法:

(一) 采用树, 有效管理数据库。采用树的有效管理能够减少视景仿真过程中对视景数据库遍历所花的时间。

(二) 简化树型目录层次结构。这种方法能有效降低模型的复杂度。建模过程中, 层次结构视图和用户是交互的, 可以通过鼠标选择后拖曳或点击进行编辑的方法达到重新安排结构的目的, 从而简化树。

### 2.3 LOD 模型应用

几何建模中, 我们发现在平地行走训练环境模型大面积场景中, 远处的场景会出现纹理闪烁现象, 为此, 我们采用 LOD 模型的机制来解决这一问题。LOD 模型就是细节层次模型, 就是为场景中的某个物体建立多个相似的模型, 不同的模型对物体的描述不同, 细节描述越精确, 模型越复杂。其应用主要是随着视点观察模型远近的不同, 模型的面数发生改变而改变观察清晰度的问题。我们给平地行走训练环境模型建立两个 LOD 模型, 这两个 LOD 模型有一样的面数, 但贴上模糊和不模糊两种不同的纹理, 当视点在远处时, 调用贴有模糊纹理的模型, 这样看上去, 远处场景就不会出现纹理闪烁现象了。

### 2.4 纹理格式问题

纹理的处理效果直接影响到整个模型的真实性和在贴图过程中, 如果不加以注意将导致视景驱动程序无法运行。纹理的处理主要注意以下几个问题:

(一) 纹理图片的格式应为 RGB 或 RGBA 格式。这两种图像格式并不常用, 为将通用图像数据格式转换为 RGB 或 RGBA 格式, 可以在 Creator 的安装光盘中 Free Stuff 子目录中找到 RGB 和 RGBA 格式的插件, 并将该插件拷贝到 Photoshop 的安装目标中, 就能在 Photoshop 中实现图像格式的转换。

(二) 纹理文件的像素值应限制为 2 的整数次幂, 这样才能保证正常显示。

### 2.5 重叠问题

我们在建立环境模型时, 经常会遇到面和面重叠的情况, 当两个面都贴上纹理时, 就会在重叠的地方出现画面闪烁的现象, 直接影响视觉效果。这主要是由于多边形重叠会使多边形在空间位置上有相同的深度值, 用 Z-BUFFER 算

法进行图形显示时, 无法正确判断哪一个多边形的点应该优先显示, 于是出现有的帧显示这个多边形上的点, 有的帧显示那个多边形上的点, 从而引起画面的闪烁。我们采用对多边形进行适当数量的叠加, 使重叠的面积尽量减小, 和设置子面的方法很好地解决了纹理重叠的问题。

## 3 视景驱动关键技术

该系统的视景驱动是通过 Lynx 图形用户接口生成教学模拟训练系统的初始化文件 Robot.RDF, 然后通过 VC++ 调用 Vega 库中的函数进行编程来实现对模型的交互控制。

### 3.1 碰撞检测技术

碰撞检测对实现自然、精确的人机交互具有重要意义。碰撞检测主要进行两部分工作: 一是检测是否有碰撞; 二是计算出碰撞的位置。Vega 提供了八种模式有效地进行碰撞检测, 分别是 Z、VOLUME、HAT、ZPR、LOS、TRIPOD、BUMP、XYZPR。在本系统中, 我们采用 TRIPOR 和 BUMP 两种模式来实现碰撞检测。TRIPOR 模式固定在机器人的车体上, BUMP 模式用于检测机器人和物体在前后, 左右, 上下六个方向上是否发生碰撞。在 Vega 中, 这个功能是通过设置物体 (vgObject) 或物体中某个部分 (Part) 的 Insector Class 来实现的。

在 Vega 提供的基本碰撞检测的基础上, 我们通过分块设置掩码、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等方法, 很好地解决了模拟训练系统中的碰撞检测问题。

### 3.2 运动控制

运动控制是与物体交互的最基本的操作。要控制物体运动, 首先要在模型中需要运动的关节处建立 DOF。在 Vega 中, 物体的位置和方向信息保存为矩阵和向量两种形式, 这些信息组织在称为 VgPosition 的元素中。在这里我们使用的是单精度向量信息格式。机器人模型要在三维空间中实现运动需要控制物体在三维坐标系内的平移和旋转, 包括机器人在三维空间的位置平移和水平面内左右转动 (heading), 垂直面内前后转动 (pitch), 垂直面内左右转动 (roll)。所以在三维空间和机器人运动相关联的一共有六个参数变量。例如, 在模拟训练系统中实现机器人大臂抬起的操作代码如下:

```
void downbigarm(float delta)
{
float x,y,z,h,p,r;
vgPosition *rpos;
rpos=vgNewPos();
if(pickobj==1)pick_bomb();
/*如果抓炸弹, 炸弹随它一起动*/
vgGetPos(bigarm,rpos);
vgGetPosVec(rpos,&x,&y,&z,&h,&p,&r);
if((p<=0.0f&&p>=219.0f))
```

```

/*当大臂碰到车体时不能移动*/
if(IsFingerDownCollided()==FALSE)
/*如果下方有碰撞不能移动*/
{p=p-delta;}
vgPosVec(rpos,x,y,z,h,p,r);
vgPos(bigarm,rpos);
vgDelPos(rpos);
}

```

### 3.3 设置视点

为了多视点、多方位、多种形式地全面观察视场中的景物，使视场中的景物从不同的角度展现在用户面前，就需要采用多种视点观察模式。在本系统中设计了远、中、近三个不同的观察者和机器人车体摄像机，小臂摄像机两个视点，这样就可以在多个视点间进行切换，多方位地观察环境场景和机器人自身的运动。场外观察者的视点通过 Lynx 图形用户接口初始化设置，机器人车体摄像机和小臂摄像机的视点通过编程设置。代码如下：

```

CpositionPose posSATemp;
VgPosition *positionTemp = vgNewPos();
if(eCurrObserver== OBSERVER_ON_ARM)
/*设置小臂摄像机*/
{
vgGetWCSPos(vgpConCamera,positionTemp
vgGetPosVec(positionTemp,&posSATemp.m_x,

```

```

&posSATemp.m_y,&posSATemp.m_z,
&posSATemp.m_h,&posSATemp.m_p, &posSATemp.m_r);
vgPos(obsOnArm,positionTemp);
}
else if
(eCurrObserver == OBSERVER_ON_BODY)
{
设置车体摄像机;
}
vgDelPos(positionTemp);

```

## 4 系统演示实验

利用上述关键技术，我们成功地实现了排爆机器人教学模拟训练系统，在该系统上，我们分别进行了在线演示、交互演示、机器人关节运动、视点切换、机器人平地行走、上下斜坡、上下楼梯、抓取爆炸物、搬运爆炸物、放置爆炸物、避障、沿走廊行走、以及各训练模块的技能考评等多项演示实验，均取得了很好的演示效果。图 5~9 分别给出了部分演示实验结果。其中，图 5 为小臂抬起演示实验结果，图 6 为视点切换演示实验结果，图 7 为爬楼梯演示实验结果，图 9 为技能考评演示实验结果。该教学模拟训练系统已经通过了用户的试用，证明系统具有较强的真实感、沉浸感和交互性，并且满足系统实时性要求。



图 5 小臂抬起演示实验结果

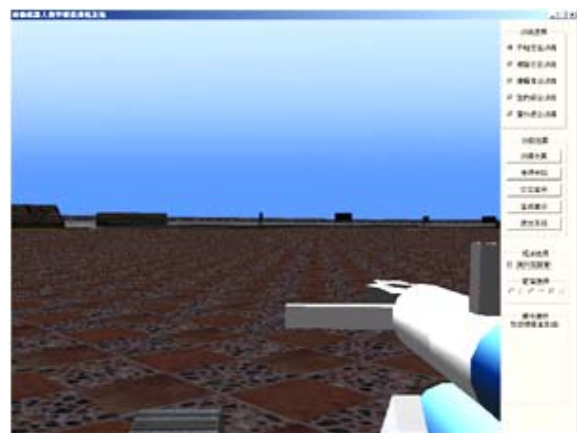


图 6 视点切换演示实验结果

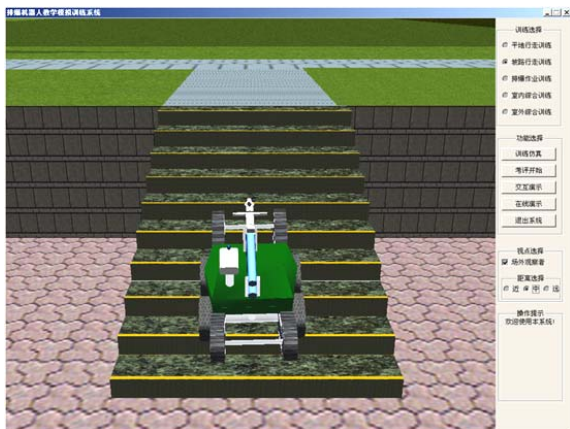


图 7 爬楼梯演示实验结果

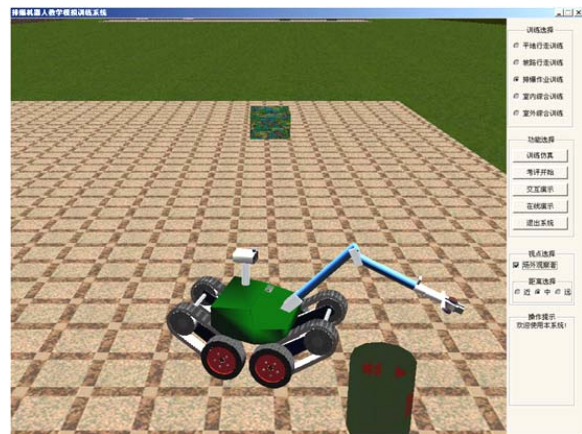


图 8 排爆作业演示实验结果

开始发送网络数据。由 3.2.1 的分析可知,  $v(kt)$  传送到航行控制计算机的时间为  $t_1 = \max(t_i^s)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ 。其中  $t_i^s$  为表 1 中第  $i$  个传感器数据包的网络传输平均时间延迟, 由表 1 可知  $t_1 = 16.06(ms)$ 。

到  $t_1$  时刻,  $v(kt)$  到达航行控制计算机, 考虑最好的情况: 此时航行控制周期利用  $t_1$  时刻的  $v(kt)$  和  $r(k)$  对潜器进行航行控制。亦即由闭环控制计算  $\sigma_k^t(r(k), v(k(t))) = u(kt)$  得到控制量并发送给执行机构, 设控制算法计算的时间为:  $\Delta t$ , 则在  $t_1 + \Delta t$  时刻发出控制命令  $u(kt)$ 。

到  $t_1 + \Delta t$  时刻, 航行控制器利用 Modbus/TCP 协议发送控制量网络包。由 3.2.2 的分析可知网络数据传输延迟  $t_2 = 8.2(ms)$ , 在  $t_1 + \Delta t + t_2$  时刻到达真实设备端的网络连接。因为虚拟段和真实端之间是对称连接, 故知  $t_1 + \Delta t + 2 \times t_2$  时刻虚拟仿真计算机得到  $u(kt)$ 。

到  $t_1 + \Delta t + 2 \times t_2$  时刻, 虚拟仿真计算机接收  $u(kt)$ , 经过螺旋桨模型及潜器的水动力推算。经过测试可知螺旋桨和潜器水动力推算的时间最大为  $t_3 = 0.25(ms)$ 。

由以上分析可知: 数据的一个网络传输循环时间为  $T = t_1 + \Delta t + 2 \times t_2 + t_3 = 32.71 + \Delta t(ms)$ 。亦即整个循环中数据在以太网上的传输时间大约为 32.71ms。显然整个控制系统的控制周期必须满足:

$$\mu \geq t_1 + \Delta t + 2 \times t_2 + t_3 ;$$

### 3.3 控制器计算时间约束

由于载人潜水器系统惯性较大, 控制周期为秒级。假设  $\mu = 200ms$ , 则可知航行控制计算机的控制计算周期须满足如下不等式:

$$\Delta t \leq 167.29(ms) ;$$

(上接第 70 页)

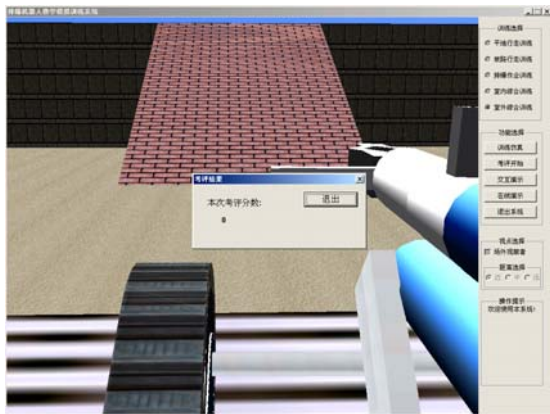


图 9 技能考评演示实验结果

## 5 结论

本文给出了我们开发的排爆机器人教学模拟训练系统的结构和功能, 并详细论述了其关键实现技术。演示实验和用户试用表明该模拟训练系统能够逼真地模拟出排爆机器人的各种作业过程, 功能较全, 简洁方便, 其设计具有较强

的针对性和实用性, 可以满足系统实时性要求, 在实际应用中取得了良好的效果。本文对于环境建模和视景驱动中关键问题的解决方法对于其他仿真系统的建立也具有一定的参考价值。

## 4 结论

现阶段, 整个系统已经开发成功, 并投入运行到潜器控制系统软件的安装调试中。这不仅可以使开发者在没有实际设备的情况下能够正常的调试潜器的控制系统, 测试其稳定性。而且使得潜器其它系统的开发科学家能够直观的了解整个控制系统的开发进展, 实时的观察潜器的深海作业时的概况。因此, 对于调试一个稳定可靠的控制系统, 缩短潜器的开发周期具有一定的理论和实际意义。

### 参考文献:

- [1] 陈厚泰. 潜艇操作性[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981. 135-148.
- [2] 宋志明等. 水下航行器视景仿真系统研究[J]. 系统仿真学报, 2001, 13(2): 150-152.
- [3] 张禹等. 自治水下机器人实时仿真系统开发研究[J]. 计算机仿真, 2004,(4): 155-158.
- [4] T W Kim, J Yuh. Development of real-time control architecture for a semi-autonomous underwater vehicle for intervention missions Control [J]. Engineering Practice, Published by Elsevier Ltd, 2004,879-880.
- [5] Kyung Chang Lee, Suk Lee, Performance evaluation of switched Ethernet for real-time industrial communications [J] Computer Standards & Interfaces, 2002, (24): 411-423.

### 参考文献:

- [1] 杨德智, 明守远. 地面排爆机器人的应用[J]. 机器人技术与应用, 2004, 4: 31-36.
- [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] Multigen-Paradigm Inc. Multigen Creator User's Guide [M]. U.S.A.: Paradigm-MultiGen Inc, 2001.
- [4] 鲁鹏寿. 虚拟现实软件系统的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2001.
- [5] 吴亚东, 蔡勇, 韩永国. 虚拟场景展示系统研究[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(11): 1517-1519.
- [6] 褚彦军, 康凤举, 唐凯, 等. 分布交互环境下的视景系统研究与开发[J]. 计算机仿真, 2004, 21(1): 32-34.
- [7] 董光波, 马立元, 张锡恩, 等. 某型导弹飞行攻击阶段仿真的研究与实现[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(3): 408-411.
- [8] 宋志明, 唐凤举, 唐凯等. 水下航行器视景仿真系统的研究[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(6): 761-764.